

A decorative border with intricate floral and scrollwork patterns in a dark green color, framing the central text.

La Physique Quantique (enfin) expliquée simplement

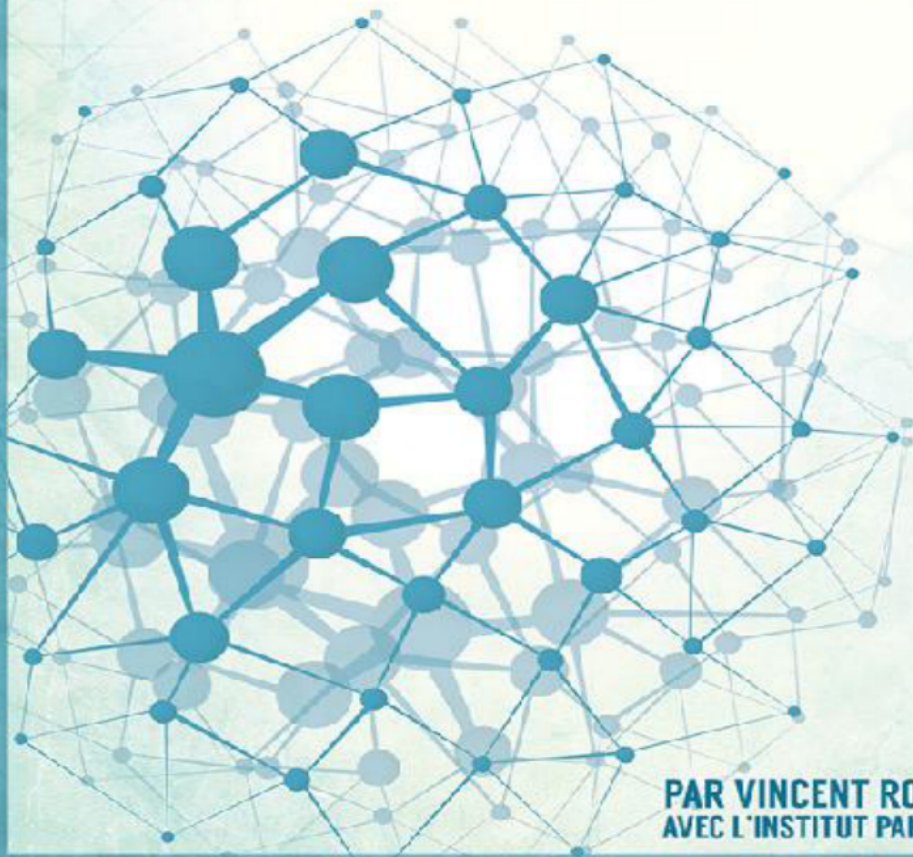
Vincent Rollet

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

LA PHYSIQUE QUANTIQUE

(ENFIN) EXPLIQUÉE SIMPLEMENT



**PAR VINCENT ROLLET
AVEC L'INSTITUT PANDORE**

LA PHYSIQUE

QUANTIQUE

| (enfin) expliquée simplement.

Par Vincent Rollet

Édité par l'Institut Pandore

Correction par Sophie Loir (sophie@institut-pandore.com)

ISBN : 978-2-9539663-8-1 (9782953966381)

© Institut Pandore, 2011-2014

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause est illicite » (art. L. 122-4)

Cette représentation ou reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

Préface et conseils au lecteur

par Stéphane Paton

Pourquoi la physique quantique ou l'économie sont-elles des disciplines si compliquées à appréhender pour un débutant ? J'ai trouvé la réponse en travaillant avec Vincent Rollet, l'auteur émérite de cet ouvrage.

Ce ne sont pas les raisonnements qui sont complexes. Le problème ne vient pas non plus du vocabulaire ou de la pédagogie, bien qu'elle ait évidemment son importance

Le problème vient de l'accumulation de « petites notions » qu'il est nécessaire de comprendre pour avancer. Chaque pas en avant dans l'apprentissage de la physique quantique vous oblige à apprendre ou réapprendre une notion mathématique ou physique fondamentale.

Aussi, on ne peut pas raconter la physique quantique de la même manière que l'on raconte un conte à un enfant. Les mots ne suffisent pas toujours à décrire cette étrange science : il est nécessaire d'utiliser des équations et des formalismes scientifiques bien particuliers.

Toutes ces petites embûches sont surmontables pour celui ou celle qui veut comprendre la manière dont le monde fonctionne, agit et réagit autour de lui.

Prenez le temps de lire ce livre. Prenez le temps de compléter votre lecture grâce à Internet, qui fourmille d'explications et de détails qui vous aideront à avancer.

Le site internet physiquequantique.fr a été édité parallèlement à cet ouvrage. Il a pour objectif de répondre à toutes vos interrogations sur la physique quantique. Si vous n'avez pas compris une explication dans ce livre, ou si vous avez une question concernant la mécanique

quantique, n'hésitez pas à la poser à l'adresse suivante :

Accéder à l'espace questions/réponses :

www.pandore.it/questionquantique

Les questions les plus fréquemment posées feront l'objet d'un article complet sur le site et nous permettront d'améliorer ce livre pour de futures éditions.

C'est une occasion unique de bien comprendre le monde incroyable de la physique quantique.

Excellente lecture à vous.

Stéphane Paton

fondateur de l'Instiut Pandore

Introduction

Le monde de la physique quantique est rempli de paradoxes en tous genres, mais ce qui est le plus étonnant en mécanique quantique est l'intérêt que suscite cette branche de la physique dans le grand public. Même si la physique quantique abonde de notions contre-intuitives et qu'elle est essentiellement composée de formalismes mathématiques inaccessibles au plus grand nombre, tout le monde connaît le mot « quantique ». Il vous suffira d'aller au cinéma voir la dernière grande production hollywoodienne pour entendre parler d'ordinateurs et de téléportation quantiques, la mécanique quantique incomprise pouvant servir de justification à tout et n'importe quoi.

Ne pensez pas néanmoins que c'est en écoutant les cinéastes américains que vous comprendrez ce qu'est vraiment la physique quantique. La physique moderne, et en particulier sa branche quantique, se base quasi-exclusivement sur une mathématique résolument complexe et parfaitement abstraite. La plupart des livres qui traitent le sujet sont ainsi inaccessibles à ceux qui n'ont pas (encore) découvert ces aspects théoriques. Mettre entre les mains d'un intéressé un ouvrage décrivant de manière exhaustive la physique quantique ne ferait que le décourager. Comment aborder alors le sujet lorsque l'on ne dispose pas de bases mathématiques solides ? Cet ouvrage a été écrit pour répondre à cette attente, et permettre un premier pas dans le monde passionnant de la physique quantique.

Il vous présentera en premier lieu la physique quantique depuis sa genèse, en expliquant comment les physiciens ont, petit à petit, décelé les différents paradoxes qui la rendent si étrange.

Dans la seconde partie, vous découvrirez l'aspect mathématique de la physique quantique et les théories fondamentales de la mécanique quantique.

Enfin, la dernière partie du livre vous présentera la physique des particules, qui découle de la physique quantique. Les quelques notes théoriques contenues dans cet ouvrage ne font qu'entre-ouvrir la porte qui sépare la partie mathématique de la mécanique quantique et l'interprétation physique de ses résultats. Ceux qui veulent aller plus loin pourront alors franchir le pont, et comprendre la théorisation de la physique quantique en lisant des ouvrages plus complets. Néanmoins, un tel approfondissement n'est pas nécessaire à la compréhension de ce livre, écrit pour quelqu'un qui n'aurait aucune base préalable.

Quelle que soit la raison pour laquelle ce livre vous a attiré, nous espérons qu'il répondra à vos attentes et vous permettra de bien cerner ce qu'est la physique quantique. C'est en effet le discernement qui pose problème dans la physique de l'infiniment petit, monde dans lequel tout semble flou... pour l'instant.

La remise en cause de la théorie classique

La physique

Pourquoi la mer apparaît-elle bleue ? Pourquoi le bout d'une flamme est-il jaune ? Pourquoi les objets tombent ? Certains hommes ont voulu trouver une réponse à ces questions, et savoir quelles lois universelles régissent le monde. Comme ces lois devaient être vraies et applicables partout, on a nommé « science » la pratique de cette recherche du vrai (du latin *scientia* qui signifie « connaissance », « savoir du vrai »). Parmi les « scientifiques », certains se posaient des questions sur les objets qui les entouraient : les physiciens. D'ailleurs, le mot physique provient de *φυσική* (prononcez *phusikè*) qui veut dire en grec « l'étude de la nature ».

Pendant des siècles, les physiciens ont étudié le monde. Vous connaissez sans aucun doute un bon nombre de ceux-ci : Galilée, Newton, Huygens, Descartes, etc.

Si ces scientifiques ont travaillé dans des branches différentes de la physique, ils ont un point commun : ce sont des physiciens dits « classiques ». Ils croyaient à ce que l'on appelle le déterminisme, c'est-à-dire à la prévisibilité des événements physiques.

Par exemple, si on lance une balle, en connaissant la vitesse à laquelle on a lancé ce projectile, son angle de lancer et quelques autres informations, on pourra prédire avec exactitude la trajectoire de la balle. En astrophysique, on peut prévoir avec une grande précision la date de la prochaine éclipse solaire.

Cette physique déterministe sera comme vous le verrez remise en cause par la physique quantique.

Divisons le monde !

Une galaxie, une planète, une mer, un éléphant, un arbre, un chat, une

fourni, une molécule, un atome... Les physiciens vont devoir étudier tous ces éléments, qui obéissent tous à des lois quasi similaires. Mais il y a un problème. La voie lactée mesure 100 000 années-lumière de diamètre, soit 9 460 895 288 762 850 000 000 m. On a du mal à se le représenter. Dans l'autre sens, un atome mesure 0,000000000062 m. Très dur à se représenter également.

C'est pourquoi nous avons tendance à diviser le monde en 3 niveaux :

- L'univers : c'est l'infiniment grand, les galaxies, les planètes ;
- Le monde macroscopique : c'est tout ce qui est à notre échelle : une pomme, une fourmi ;
- Le monde microscopique : c'est l'infiniment petit, ce que l'on ne peut pas voir à l'œil nu (un atome, une molécule).

Les physiciens vont étudier ces milieux séparément, pour éviter de s'emmêler les pinceaux. Néanmoins les lois restent en général les mêmes. Les galaxies comme les arbres obéissant aux mêmes lois de gravitation. Seuls les ordres de grandeur changent. Cette généralisation des lois physiques sera remise en cause avec la mécanique quantique...



 **EST INCLU DANS**

FIG. 1.1: *l'étude de la physique se fait à différentes échelles.*

Au XIX^e siècle, les physiciens pensent avoir tout découvert et le monde de la physique semble bien calme mais, par chance pour nous, cela n'a pas duré !

Les atomes

En chimie, et ce depuis que Lavoisier en a fondé les bases, les éléments occupent une place fondamentale. Toute la matière sur Terre est composée d'un mélange de différents éléments, non pas quatre comme Aristote le pensait, mais une multitude (on en connaît aujourd'hui plus d'une centaine). Ces éléments sont par exemple le carbone, l'or, le fer, l'hydrogène, etc.

Au XIX^e siècle, tous les physiciens s'accordent sur l'existence des différents éléments, mais il existe toujours une lutte pour savoir si la matière est composée, ou non, d'atomes. Les atomes sont d'après les « atomistes » des particules très petites, invisibles à l'œil nu, et que l'on ne pourrait scinder : les atomes sont indivisibles, insécables (*atomos* en grec). Ils seraient alors la base de toute matière et tous les objets seraient composés d'un certain nombre d'atomes.

Cette lutte entre ceux qui croyaient à l'existence des atomes et ceux qui n'y croyaient pas durait depuis l'antiquité : si Démocrite avait prédit leur existence, c'est le point de vue d'Aristote, anti-atomiste, qui fut privilégié jusqu'au début du XX^e siècle, où tout va changer...

Le mouvement Brownien

Étonnamment, la réponse à la question de l'existence des atomes ne va pas venir de la physique mais de la biologie.

En 1828, un botaniste écossais, Robert Brown, travaille sur le pollen et essaye de comprendre comment ces petites particules arrivent à féconder les plantes. Il prend quelques grains de pollen (de quelques micromètres de diamètre), et les place dans un bain d'eau, pour l'observer au microscope. Avec l'un des tout premiers microscopes précis, il observe les grains. Problème : ils sont constamment en mouvement. Ils avancent, reculent, tournent sur eux-mêmes. Un

mouvement qui ne semble pas anormal pour un élément fécondant.

Mais le phénomène intrigue Brown : il recommence avec d'autres plantes, et des graines mortes depuis des dizaines d'années. Et pourtant, on retrouve les mêmes mouvements, que Brown décrit comme aléatoires. Brown réitère son expérience avec du verre broyé, et prouve que le phénomène est observable pour toute particule tant que celle-ci est petite. C'est très étonnant : c'est comme si vous vous teniez debout dans la rue, et que des spasmes vous secouaient sans relâche ! Ce phénomène est appelé le mouvement brownien.

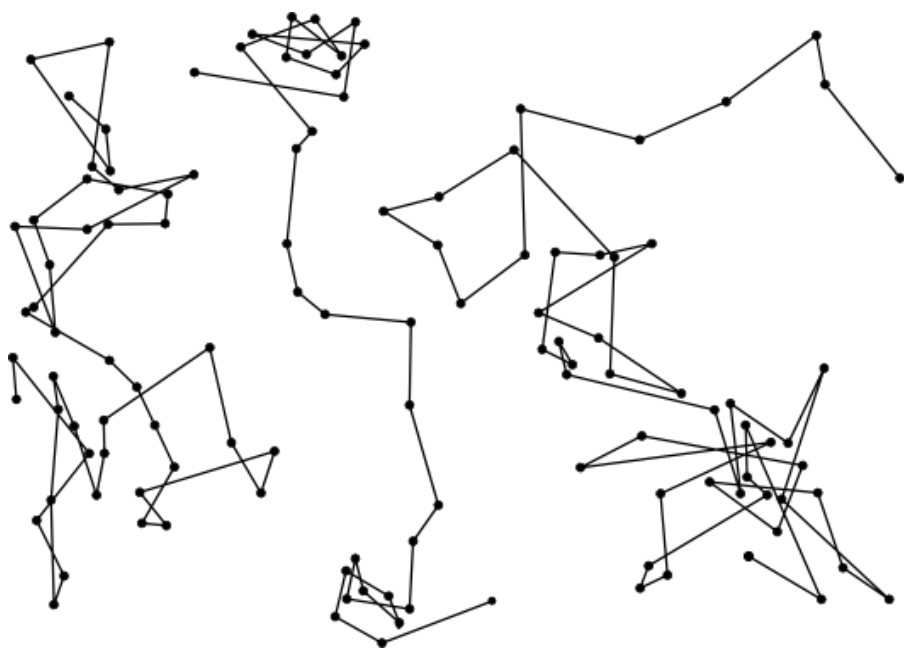


FIG. 2.1: mouvement aléatoire de grains de pollen (mouvement brownien)

De premières explications

Rapidement, de nombreuses explications furent proposées : attraction électrique, courants provoqués par la lampe du microscope, et bien d'autres. Mais cela ne prouvait pas une agitation aussi désordonnée !

En 1888, Léon Gouy montre expérimentalement que l'agitation des grains ne varie pas selon les influences extérieures (éclairage, champ magnétique...) tant que ces dernières ne modifient pas la température. En effet, lorsque l'on augmente la température du liquide dans lequel baignent les grains, le mouvement de ceux-ci devient plus vif. Comment expliquer ce phénomène ?

Einstein et le mouvement brownien

En Suisse, dans le bureau des brevets, un scientifique encore peu connu, un dénommé Albert Einstein, a une idée ! Il connaît une théorie, la théorie cinétique des gaz, selon laquelle les gaz seraient composés de petites particules qui s'agiteraient de plus en plus lorsque la température augmente. Ainsi, un gaz à faible température serait constitué de particules qui s'agiteraient peu, mais ce mouvement s'intensifie avec la température globale du gaz. Si l'on place ce gaz dans une enceinte fermée, les corpuscules vont venir frapper la paroi avec une force qui augmente avec la température de l'ensemble.

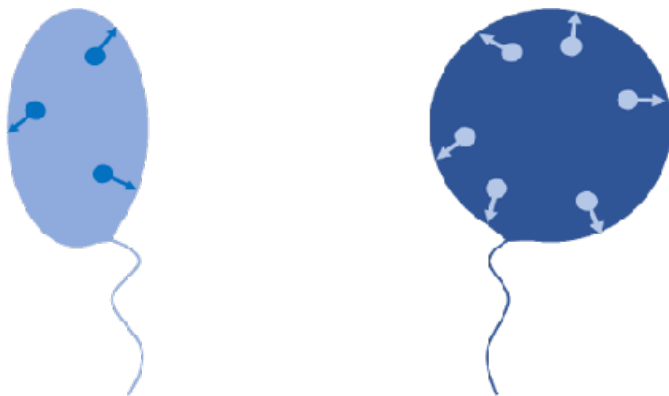


FIG. 2.2: À gauche, les particules à l'intérieur du ballon exercent une force sur les parois en les frappant. À droite, on augmente le nombre de molécules, ou la température de l'ensemble, pour créer des collisions plus fréquentes, plus importantes, et ainsi gonfler le ballon.

Si l'on peut assimiler un gaz à un ensemble de particules en mouvement, ne pourrait-on pas faire de même avec un liquide ? Les

petits éléments du liquide (des molécules) pourraient venir frapper des éléments dans ce dernier : les grains de pollen par exemple. Einstein va imaginer une expérience qui permet de calculer la quantité de molécules d'eau qui viennent frapper les grains en fonction de leur déplacement.

Dans un article, il appelle les scientifiques à faire l'expérience, et à calculer cette quantité. Jean Perrin, un Français, relève le défi et trouve le nombre de particules qui viennent frapper le grain en une seconde.

Grâce à ce résultat, il peut calculer le nombre de particules dans un volume précis d'eau. Miracle, ce nombre est le même que celui prévu par les chimistes qui croyaient à l'atome : l'existence de celui-ci est prouvée et son diamètre fixé à environ $10^{-10} m$.

Si le mouvement brownien a révolutionné la physique, c'est parce que d'après les principes de la thermodynamique, un corps ne peut bouger sans qu'il ne reçoive de l'énergie, sous forme de chaleur par exemple : ici les grains de pollen bougent mais ne puisent pas de chaleur dans l'eau. Ils ne consomment pas d'énergie.

À quoi ressemble un atome ?

Les atomes existent, mais à quoi ressemblent-ils ? Personne ne les a vus ! Nous savons déjà une chose : leur charge est neutre. Lorsque vous approchez un aimant de divers objets, la plupart ne réagissent pas !

Ces indices vont permettre aux scientifiques d'élaborer au fur et à mesure du temps des modèles de plus en plus réalistes de l'atome. Pour élaborer de tels modèles, des expériences sur l'atome seront nécessaires, afin d'en déterminer les propriétés.

Joseph John Thomson fut l'un des premiers à « dessiner » l'atome

grâce à une série d'expériences devenues fameuses.

Le modèle de J.J. Thomson

Son expérience

Il existe des éléments porteurs de charge dans les atomes qui leur donnent leurs caractéristiques. Pour savoir d'où viennent les charges présentes dans un atome, Thomson proposa en 1897 une expérience bien particulière.

Il prit un tube cathodique (un tube vidé de son air et pouvant être relié à un générateur), et relia chaque extrémité du tube à un générateur électrique.

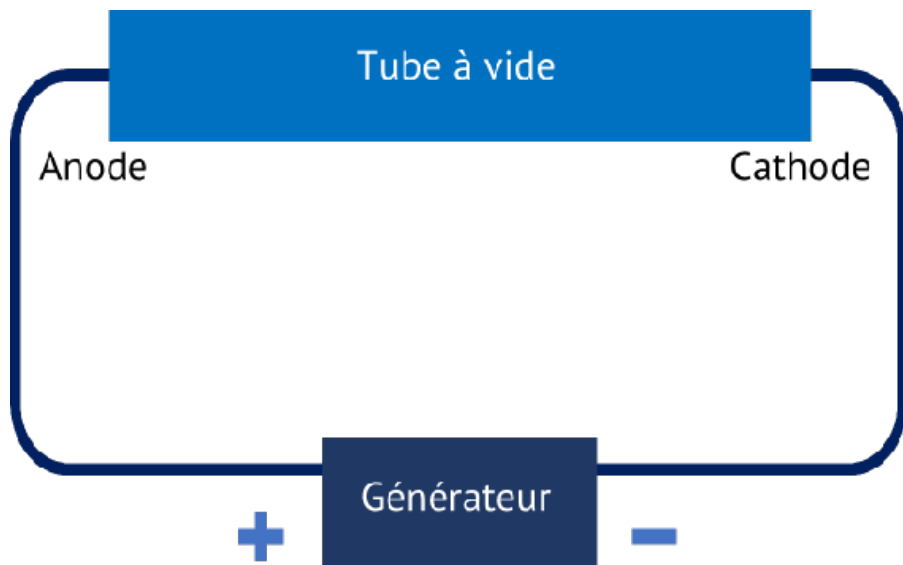


FIG. 2.3: schéma de l'expérience de thomson.

Lorsque l'on allume le générateur, on s'aperçoit que malgré le vide à l'intérieur du tube, de l'électricité va passer. Visuellement, c'est un rayon lumineux que l'on observe. Première surprise : le tube vide ne

bloque pas le chemin de l'électricité. Cela veut dire que l'électricité est composée de particules capables de se déplacer seules dans le vide.



FIG. 2.4: *photographie du tube au cours de l'expérience.*

Thomson n'est pas le premier à avoir utilisé des tubes cathodiques pour étudier l'électricité. En revanche, c'est lui qui a prouvé que le rayon qui traverse le tube cathodique est composé de particules appelées électrons.

Dans la suite de son expérience, Thomson approche un aimant du tube cathodique lorsque l'électricité circule à l'intérieur.

Son objectif est simple : connaître la charge des particules qui composent l'électricité. Est-elle positive, négative ou neutre ?



FIG. 2.5: la suite de l'expérience, ajoutant un aimant au dispositif.

Résultat : le courant électrique est dévié par l'aimant. Les électrons sont donc de charge négative. D'après Thomson, les électrons sont toujours initialement présents dans la matière autour de nous. Ils seraient arrachés de la matière pour créer un courant électrique.



FIG. 2.6: photographie du tube lorsque l'aimant agit sur le courant

Son modèle atomique

Thomson, qui croyait aux atomes avant même la démonstration de leur existence, en avait fait un modèle : puisqu'il y a des éléments de charge négative dans la matière et que l'atome est neutre, alors il doit aussi forcément y avoir des éléments de charge positive pour compenser. Thomson imagine donc un modèle type « pudding aux prunes » (*plum pudding* en anglais). L'atome serait une grosse boule de charge positive dans laquelle seraient incorporés des petits électrons de charge négative, rendant l'atome de charge neutre.

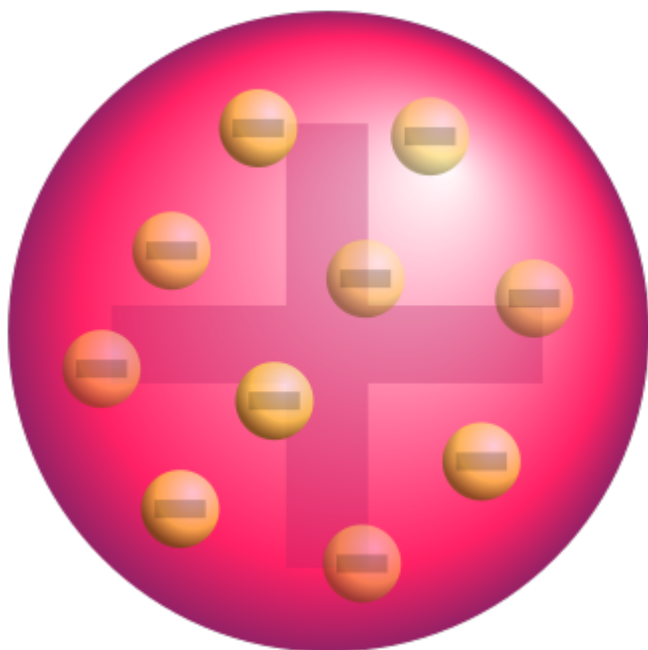


FIG. 2.7: Le modèle de Thomson : un atome et ses électrons

Mais ce gâteau paraît bien indigeste pour un élève de Thomson, un dénommé Rutherford. Celui-ci décide de faire nombre d'expériences sur l'atome pour en savoir plus. L'une d'entre elles, effectuée en 1908, sera particulièrement fructueuse et deviendra célèbre.

Le modèle de Rutherford

Son expérience

Rutherford décide d'aplatir une fine couche d'or, de sorte qu'elle n'ait que quelques milliers d'atomes d'épaisseur et devienne presque transparente. Il place cette feuille d'or à la verticale, à l'intérieur d'une enceinte faite d'un matériau fluorescent.

Puis, il dirige vers cette feuille d'or un « canon » de particules *alpha* (α), de charges positives. Comme la feuille d'or est très fine, la plupart des particules la traversent de part en part et atteignent un écran fluorescent, y laissant une trace. Mais certaines de ces particules α , au lieu de traverser la feuille d'or, rebondissent contre celle-ci ou sont déviées. Imaginez : des soldats tirent sur une boîte en carton et leurs balles leur reviennent !

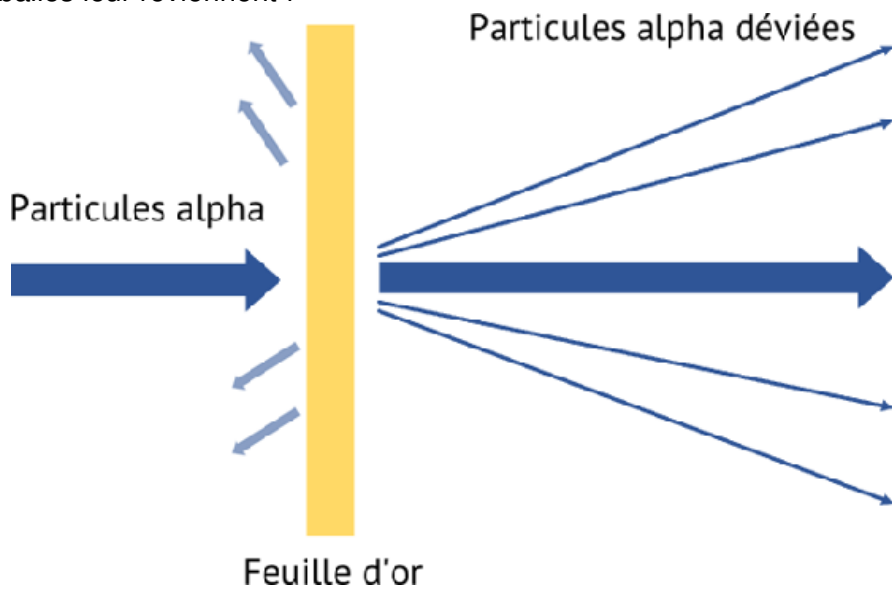


FIG. 2.8: *expérience de rutherford*

Rutherford tire diverses conclusions de cette expérience. L'une des plus importantes : l'atome est creux, et non plein comme on le croyait jusqu'alors. Si les particules traversent la feuille d'or, c'est parce que les atomes sont essentiellement constitués de vide !

Si les particules « rebondissent » de temps en temps, c'est parce que

les noyaux des particules alpha et ceux des atomes de la feuille d'or se rencontrent et se repoussent. Ils se repoussent, car ils sont tous de même charge (positive). Le principe est le même que lorsque vous tentez de rapprocher deux aimants côte à côte : ils se repoussent.

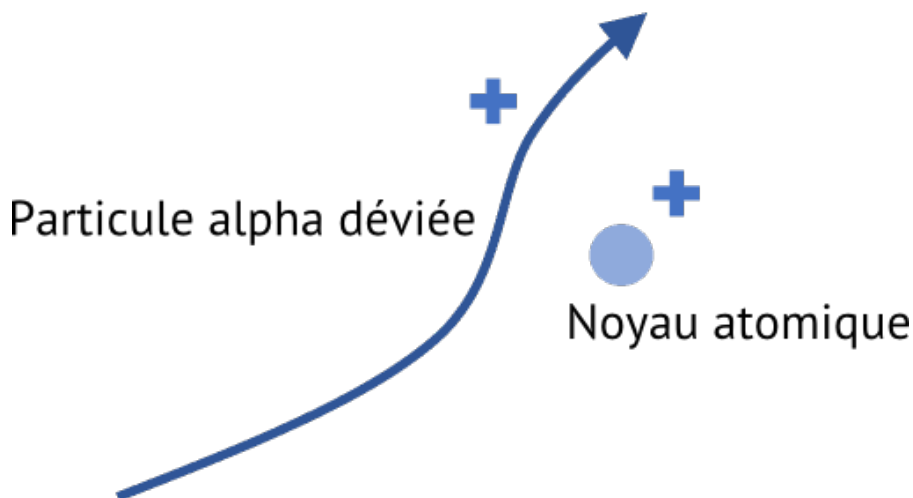
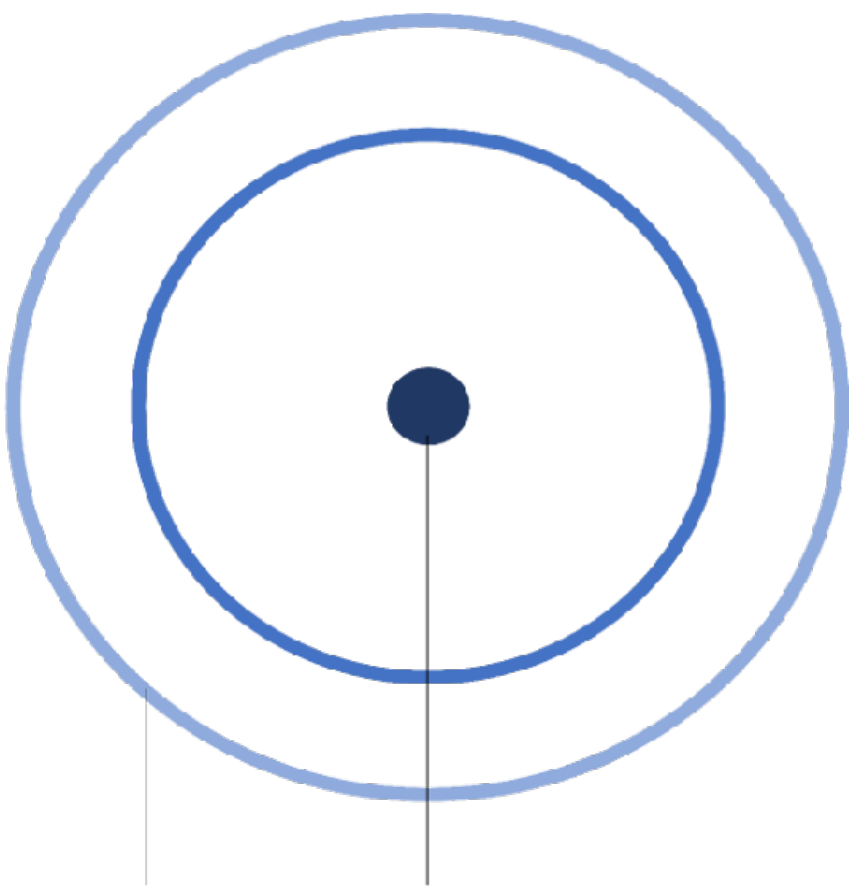


FIG. 2.9: répulsion d'une particule alpha lorsqu'elle rencontre un noyau de même charge

En 1913, pour connaître la taille d'un noyau, Rutherford utilise le compteur à particules alpha de son élève, Geiger. Il compte le nombre de particules qui rebondissent et en déduit que le noyau a une taille de $10^{(-15)}m$ (l'atome a un diamètre de $10^{(-10)}m$). La matière est vraiment constituée de vide : on dit que sa structure est lacunaire. En comparaison, si l'on rapporte la taille d'une fourmi à celle d'un noyau atomique, l'atome aurait la taille d'un stade !

Son modèle atomique

Pour Rutherford, telles des planètes autour d'un soleil, les électrons tournent autour du noyau à des emplacements bien déterminés (des orbites concentriques) avec un électron par orbite.



Couches électroniques Noyau

FIG. 2.10: schéma d'un atome simplifié (2 orbites) selon rutherford.

Néanmoins, ce modèle atomique sera vite mis à jour par d'autres physiciens qui viendront le préciser.

Le modèle de Chadwick

Son expérience

Entre 1930 et 1931, des scientifiques tels qu'Irène Joliot-Curie (fille de Pierre et Marie) étudièrent un phénomène étrange : lorsque l'on bombarde de particules alpha des corps comme le Béryllium (un métal), des « rayons » sont produits. En 1933, Chadwick découvre que ces rayons sont des particules de charge nulle : c'est la découverte du

neutron.

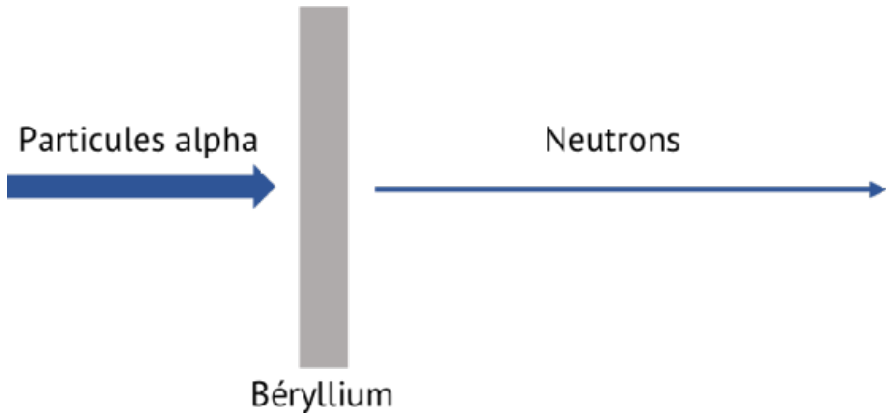


FIG. 2.11: l'expérience de Chadwick

Son modèle atomique

Chadwick démontrera subséquemment que le noyau n'est pas indivisible, car constitué de protons et de neutrons (on parle de nucléons). Il y a dans un atome autant de protons que d'électrons, et en plus un certain nombre de neutrons. Protons et neutrons ont à peu près la même masse, mais le proton a une charge positive et le neutron une charge neutre.

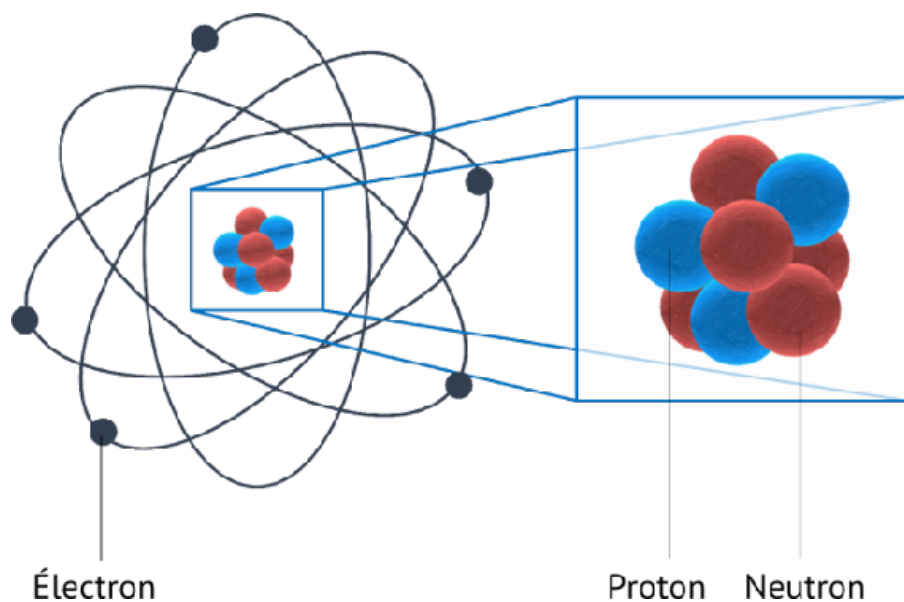


FIG. 2.12: le modèle de Chadwick

Toute la masse de l'atome (99,9 %) est concentrée dans le noyau : les électrons ne pèsent pratiquement rien !

Résumons l'atome

Si vous ne retenez pas l'évolution de tous les modèles atomiques, retenez au moins l'image ci-dessous. Nous rentrerons dans les détails de la composition des atomes un peu plus tard.

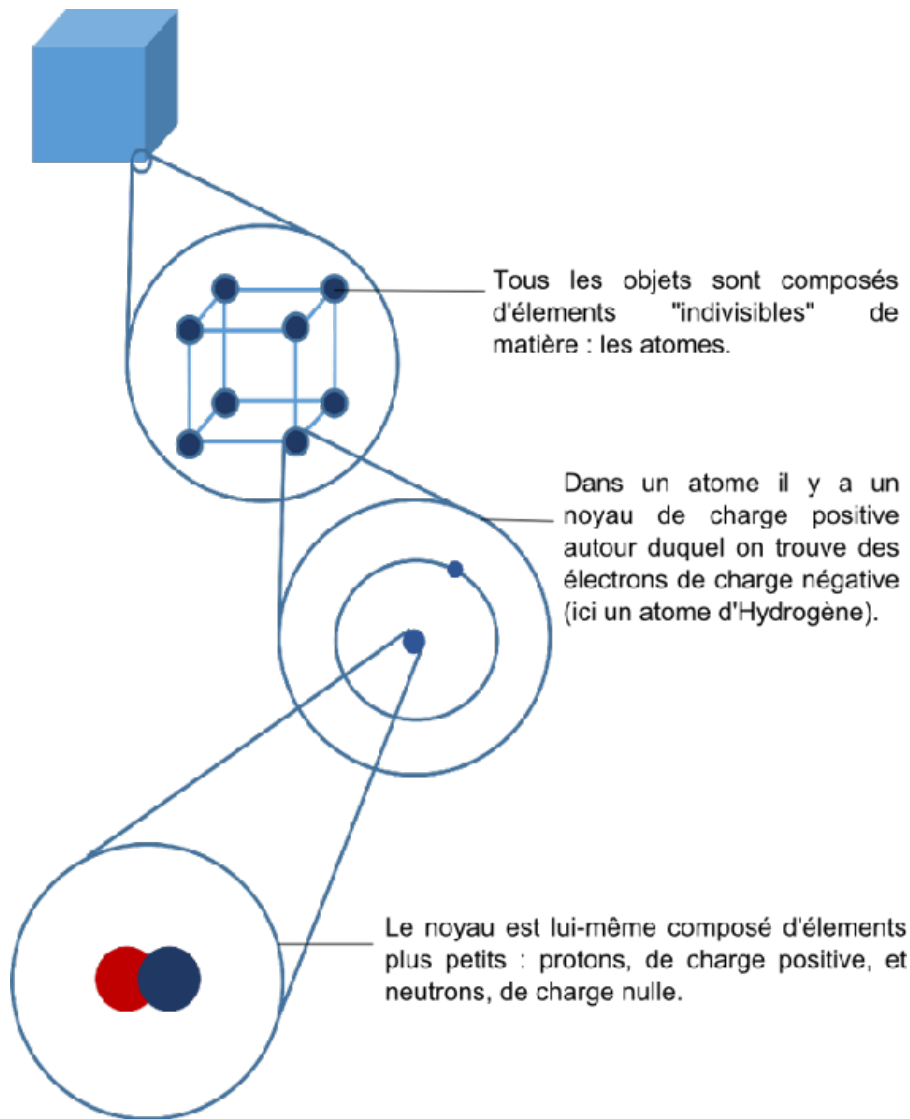


FIG. 2.13: résumé de la notion d'atome

Classons les éléments

Vous l'avez compris, la matière est constituée d'atomes. Cette découverte permettra de démontrer que les caractéristiques des éléments découlent de leur composition atomique. Un lourd lingot d'or est constitué d'atomes d'or. Chacun de ces atomes a dans son noyau 79 protons, bien plus que les deux protons qui composent l'atome d'hélium par exemple ! Voici pourquoi l'hélium est « léger » alors que

l'or est « lourd ».

En 1869, un chimiste (Dimitri Mendeleïev) a décidé de classer tous les composants de la matière dans un tableau, la classification périodique des éléments.

Les éléments y sont classés par masse croissante : sur une même ligne ils ont une masse d'un même ordre de grandeur, et les éléments en bas de la table sont plus massifs que ceux d'en haut. De plus, les éléments d'une même colonne ont des caractéristiques chimiques similaires.

1 H Hydrogen																	18 He Helium										
3 Li Lithium	4 Be Beryllium																	19 K Potassium	20 Ca Calcium								
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium																	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon										
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium												
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium												

FIG. 2.14: le célèbre tableau périodique des éléments.

« Le commencement de toutes les sciences, c'est l'étonnement de ce que les choses sont ce qu'elles sont » Aristote.

Ce qu'il faut bien comprendre

- Toute la matière qui nous entoure est composée d'atomes.
- Les physiciens ont amélioré, au fil du temps, leur manière de décrire l'atome.
- Un atome se compose de 2 choses : un noyau central – lui-même composé de protons et de neutrons – et d'électrons (autant que de protons dans le noyau) qui tournent autour.
- Mendeleïev a inventé une manière intelligente de classer les éléments : le tableau périodique des éléments.

En ce qui concerne la matière, c'est presque réglé : on sait qu'elle se compose d'atomes. Parlons un peu de la lumière désormais. Quelle est sa nature ? Se compose-t-elle aussi de particules ?

Le débat va faire rage pendant de nombreuses années. C'est en partie grâce à lui que la mécanique quantique va s'affirmer comme une branche à part de la physique.

La lumière

Si la théorie atomiste a beaucoup fait débat dans la communauté scientifique, il est un sujet qui a provoqué encore plus de polémiques : la lumière. Elle inonde tout, comme l'air, mais on ne peut pas la contenir. Elle est omniprésente, mais insaisissable. La définition même de la lumière nous échappe, c'est « quelque chose qui éclaire ». Mais ce « quelque chose », c'est quoi ?

La lumière, une onde

La différence entre ondes et particules

Une particule, c'est un morceau de matière : un atome est une particule. Nous pouvons délimiter une particule dans l'espace. Pour les ondes, c'est différent : imaginez un très grand étang, et lancez une pierre dedans. Des vagues vont se former et s'éloigner du point d'impact, perdant progressivement en amplitude. Cependant, elles ne disparaîtront jamais : elles vont devenir de plus en plus petites, mais tant qu'elles n'atteignent pas un bord, l'énergie de l'onde ne s'épuisera pas.

Une onde est une transmission d'énergie sans transmission de matière. Lors du passage d'une vague, les molécules d'eau se déplacent de haut en bas pour former des ondulations. Il y a transmission d'énergie, mais pas de matière, car les molécules d'eau ne se déplacent pas de gauche à droite.

Toute onde est caractérisée par une période spatiale (dans l'espace), dite longueur d'onde, qui se note *lambda* (λ).

Dans le cas des vagues, c'est la distance qui sépare deux crêtes. Une onde possède également une fréquence, c'est le nombre de crêtes qui passent par un point chaque seconde. Elle se note de la lettre grecque *nu* (ν).

Pour la lumière, on a $\nu = c / \lambda$, avec c la vitesse de la lumière.

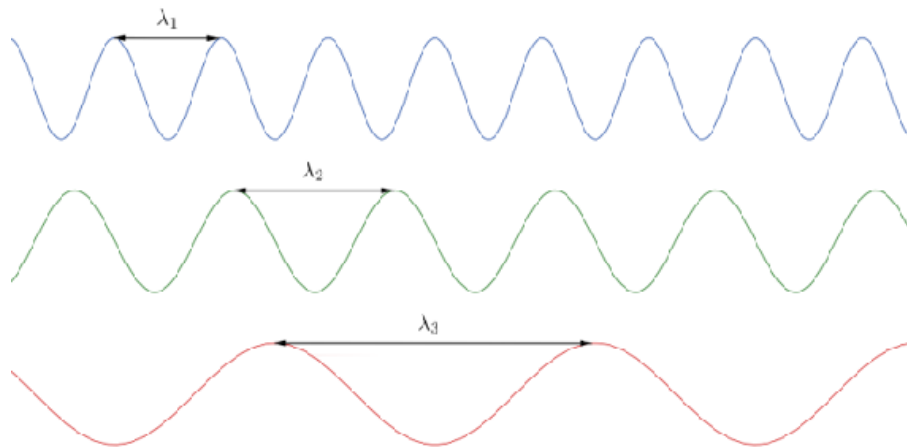


FIG. 3.1: représentation en fonction de l'espace de 3 ondes différentes
et leurs longueurs d'onde (λ_i)

La lumière, onde ou corpuscule ?

Un des premiers physiciens à faire des travaux sur la lumière fut Isaac Newton. Il écrira d'ailleurs un livre sur le sujet : *Opticks*. Dans ce livre, il explique ses différentes expériences, la plus connue étant la décomposition de la lumière blanche en plusieurs couleurs. Pour Newton, si la lumière est ainsi décomposée, c'est parce qu'elle est constituée d'un certain nombre de particules, que le prisme éparpille.

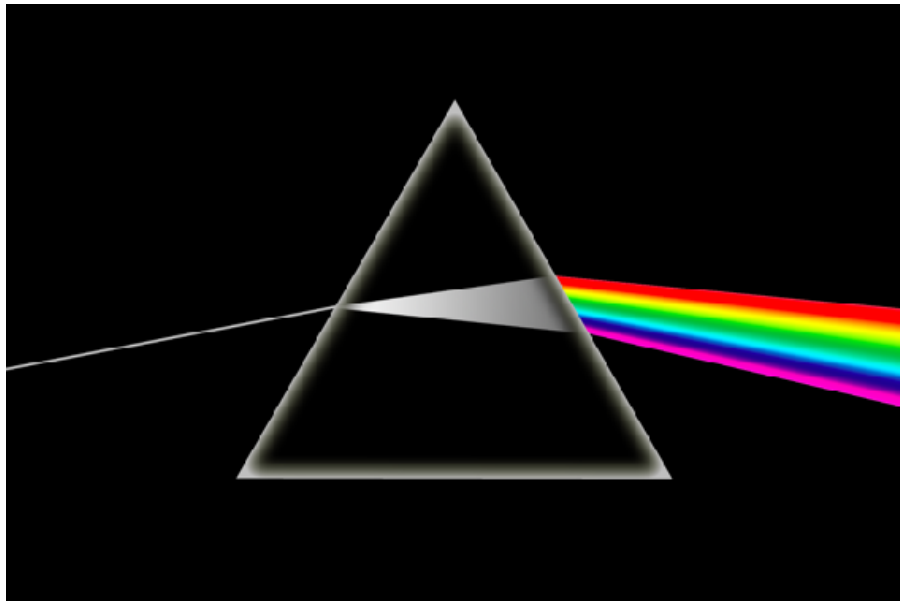


FIG. 3.2: *Un prisme qui décompose la lumière blanche*

Pour la communauté scientifique de l'époque, Newton a raison : la lumière est d'une nature corpusculaire. Pourtant, ce n'est pas le point de vue d'un autre physicien, Christian Huygens, pour qui la lumière est une onde.

Néanmoins, la renommée de Newton est si grande que la théorie corpusculaire de la lumière finira par s'imposer. Tout ceci va changer au XIX^e siècle avec un physicien nommé Thomas Young qui va prouver que la lumière est bel et bien une onde.

Avant de détailler l'expérience d'Young, revenons sur le principe d'onde. Vous en aurez besoin pour bien comprendre la suite.

La diffraction de la lumière

Principe de la diffraction

La diffraction est une propriété fondamentale des ondes. Lorsqu'une onde est exposée à une fente ou un obstacle de petite dimension (du même ordre de grandeur que la longueur d'onde), l'onde est diffractée,

c'est-à-dire qu'elle se propage dans de nouvelles directions.

Si vous êtes déjà passés à côté d'une salle où l'on joue de la musique, vous avez sans doute remarqué la chose suivante : à proximité de celle-ci, vous n'entendez pas tout le morceau joué mais uniquement ses basses.



FIG. 3.3: *diffusion de musique dans une salle*

Le son est une onde dont la longueur d'onde est particulièrement élevée, et d'autant plus élevée pour les sons graves. Voyons ce qui se passe à l'intérieur de la salle. Des haut-parleurs vont émettre des ondes sonores (la musique) dans toutes les directions. Il y a des sons graves et des sons plus aigus, de longueurs d'onde différentes.

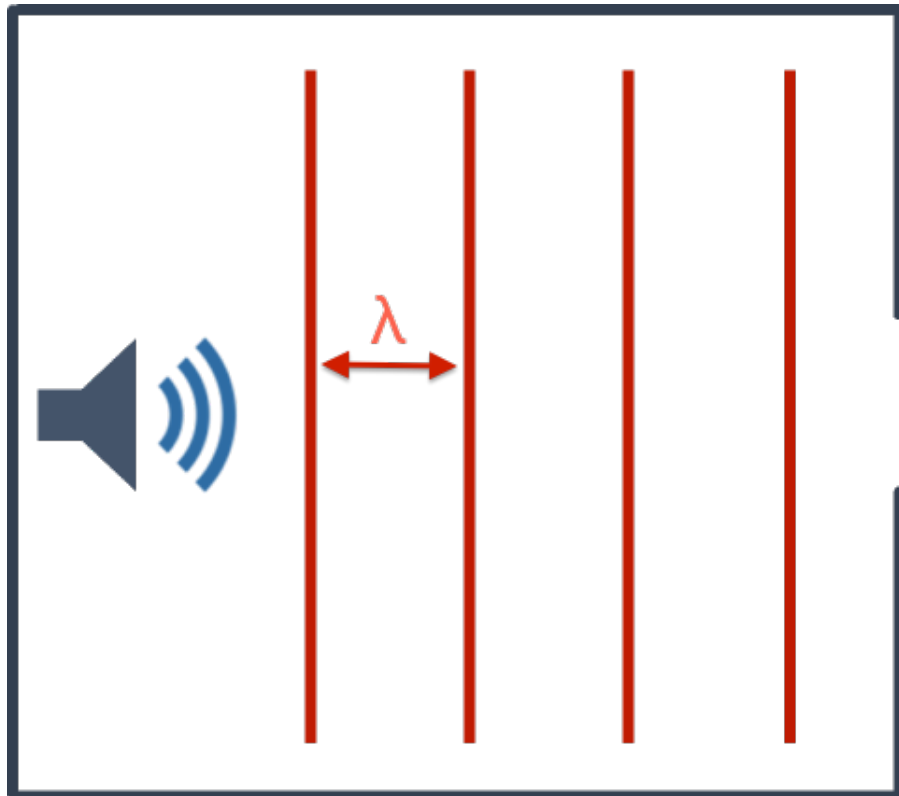


FIG. 3.4: sons graves (grande longueur d'onde)

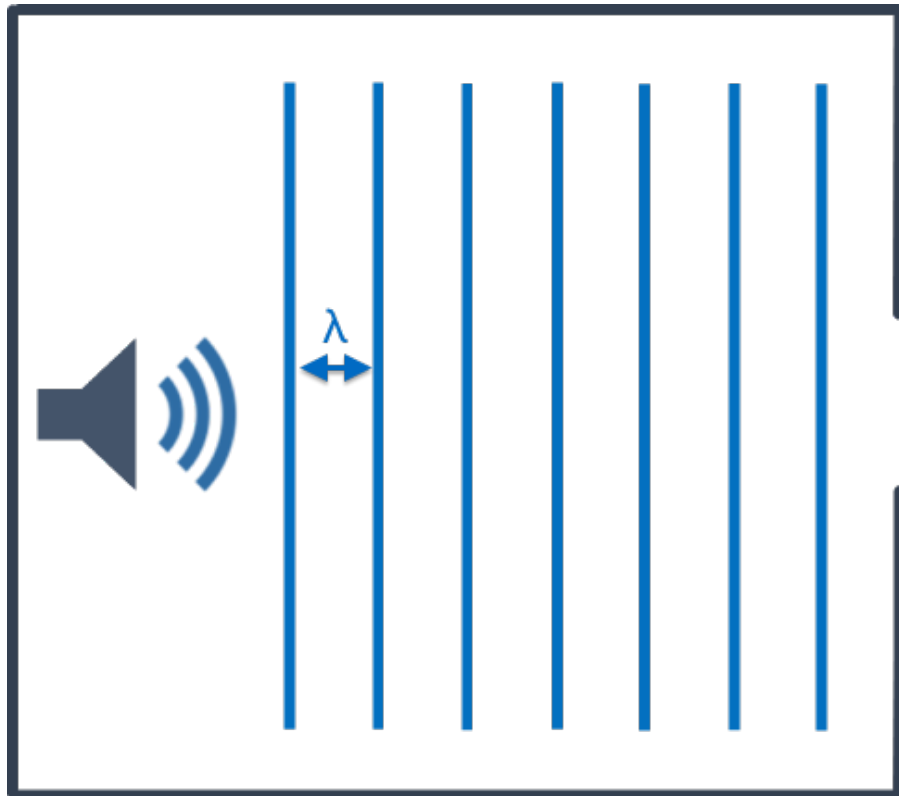


FIG. 3.5: sons aigus (faible longueur d'onde)

C'est là qu'intervient le phénomène de diffraction : les sons aigus ont une longueur d'onde suffisamment faible pour qu'en passant la porte, elles ne « s'aperçoivent » pas du changement de milieu et continuent leur chemin. En revanche, les sons graves qui ont une longueur d'onde plus élevée « s'aperçoivent » qu'ils passent un obstacle et s'éparpillent.

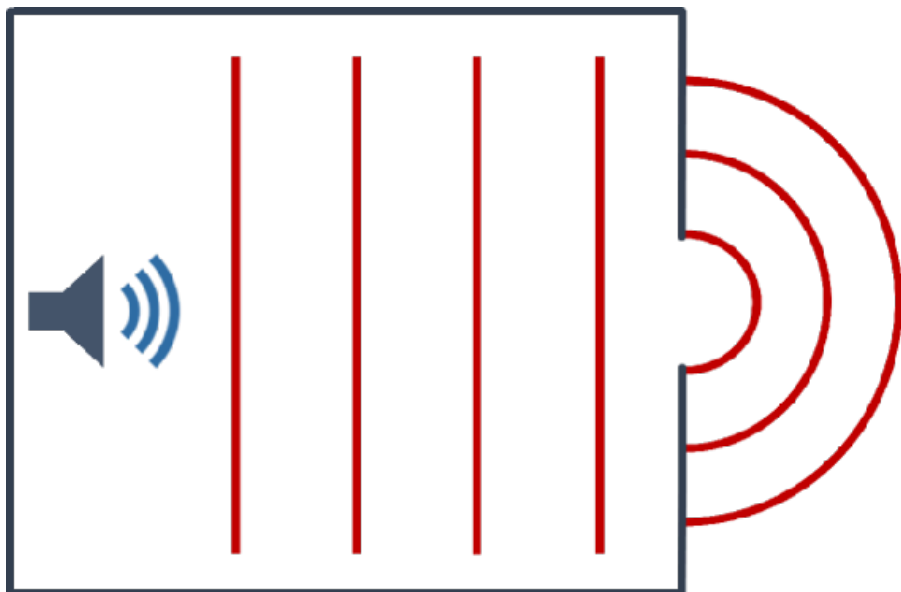


FIG. 3.6: *diffraction des sons graves*



FIG. 3.7: *Les sons aigus ne subissent pas de diffraction*

C'est à cause de ce phénomène qu'un observateur en face de la porte entend toute la musique et un observateur un peu à l'écart n'entend que les basses.

L'expérience d'Young

Lorsque deux ondes se rejoignent en un point, elles peuvent interférer. Alors, leurs amplitudes s'additionnent ou se soustraient. En un point, deux ondes en position « haute » s'additionnent pour n'en former qu'une, et deux ondes en positions contraires s'annulent.

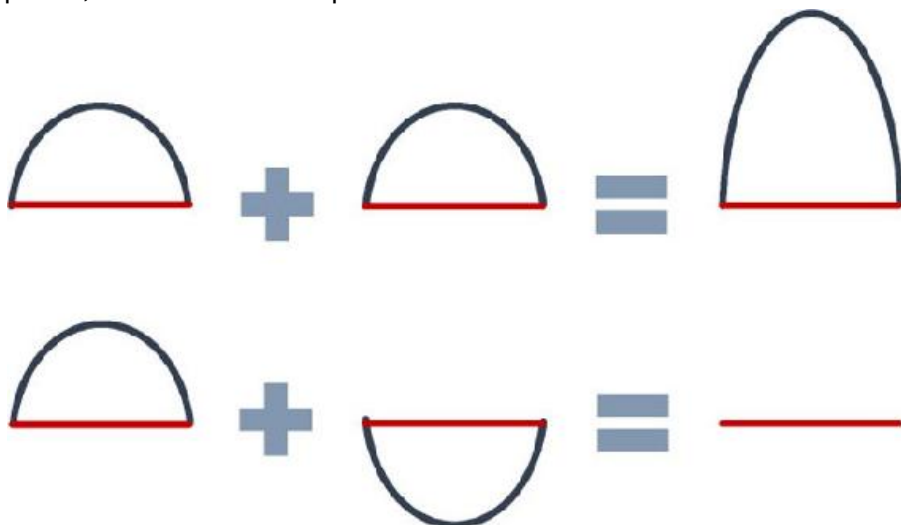


FIG. 3.8: les amplitudes de deux ondes peuvent s'additionner

Si l'on fait évoluer deux ondes côte à côte, on observe des interférences. Vous pouvez faire l'expérience avec de l'eau et deux sources d'ondes (une quelconque agitation) : vous observerez le résultat suivant.

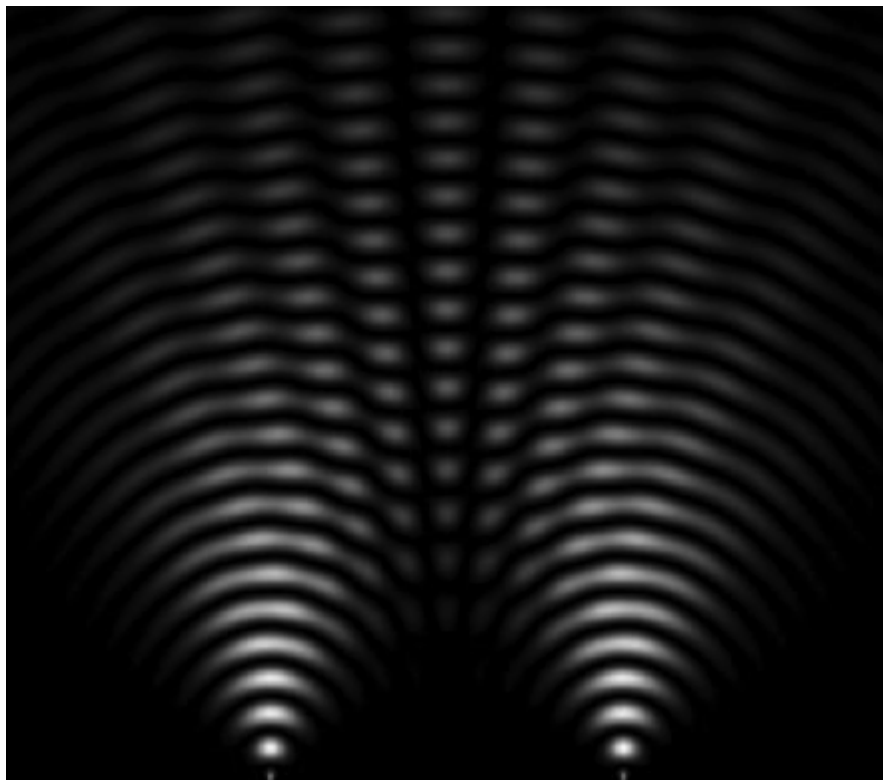


FIG. 3.9: *deux ondes interfèrent (vu de haut)*

En 1801, Thomas Young, un Anglais, décide de trancher entre les théories ondulatoires et corpusculaires de la lumière. Il fabrique un écran avec deux fentes très fines, et le place dans le montage suivant.

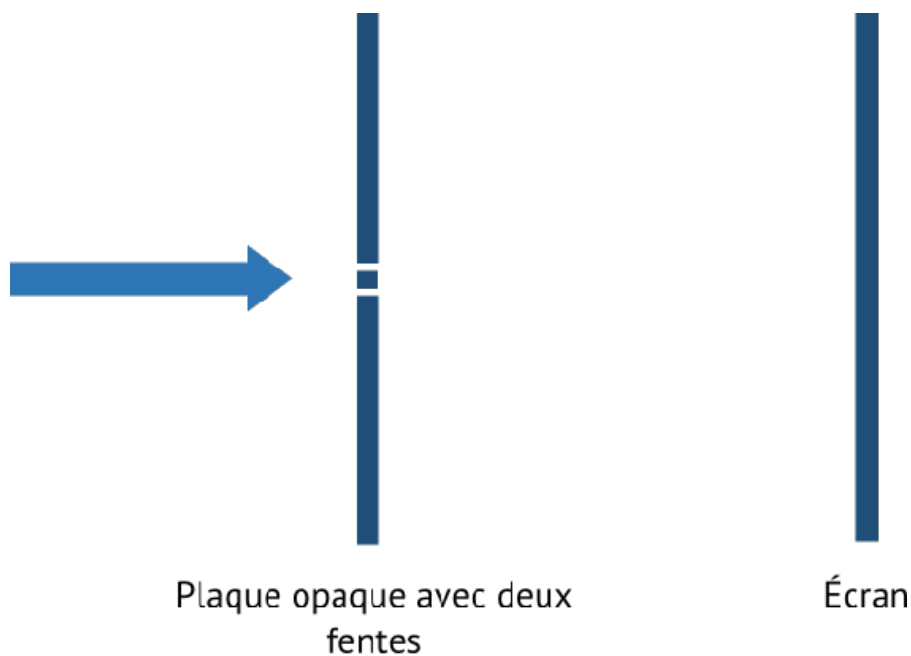


FIG. 3.10: *expérience d'young*

Si la lumière est une onde, il y aura diffraction par chacune des fentes et par la suite interférences. Si la lumière est une particule, deux fines bandes apparaîtront sur l'écran en face de la fente (comme si la lumière était composée de petites billes de peinture). Alors, la lumière est-elle une particule ou une onde ?

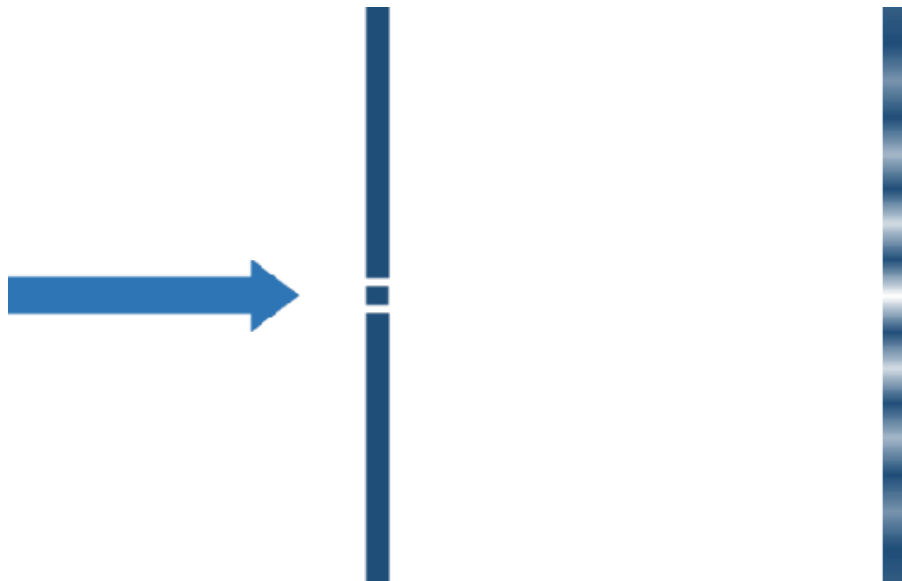


FIG. 3.11: résultat attendu si la lumière est une onde

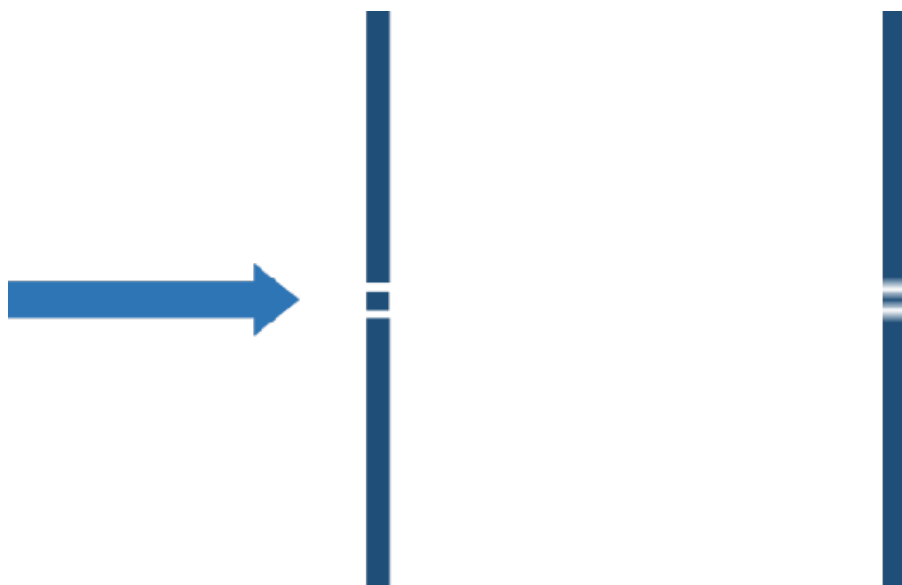


FIG. 3.12: résultat attendu si la lumière est une particule

Et le résultat est... la lumière est une onde ! On aperçoit un phénomène d'interférences. À cette époque, la conclusion est irréfutable : Newton avait tort, et Huygens avait raison. Nous verrons par la suite que la réalité est loin d'être aussi évidente.

La lumière, une onde particulière

La lumière est d'ailleurs une onde particulière : c'est une onde dite électromagnétique. Si l'on voit des couleurs, c'est parce que les objets émettent directement ou indirectement des radiations lumineuses : l'œil voit des couleurs différentes en fonction de la longueur d'onde des radiations émises.

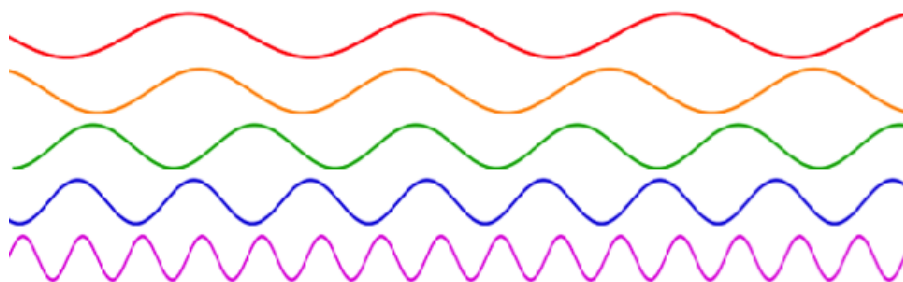


FIG. 3.13: la longueur d'onde d'une radiation lumineuse influe sur la perception colorée que nous en avons

Pour qu'un objet émette de la lumière, on peut le chauffer : il deviendra alors rouge, orange, jaune, blanc puis bleu. C'est le cas des lampes à incandescence ou du soleil qui émettent directement de la lumière. Mais d'autres objets, tels qu'une pomme, n'émettent pas directement de la lumière : ils réfléchissent une partie de la lumière qui leur provient de sources directes de lumière. Une pomme bien rouge éclairée par la lumière du soleil va absorber toutes les radiations lumineuses, sauf celles qui correspondent à la couleur rouge. Étant donné qu'elle absorbe toutes les radiations « non rouges », elle ne réfléchira que les radiations rouges. C'est pour cette raison que les objets rouges nous apparaissent de cette couleur.

De plus, et heureusement pour nous, nous ne voyons qu'un petit panel des ondes électromagnétiques. Plus précisément celles dont la longueur d'onde se situe entre 400 et 700 nm (un nanomètre équivaut à $10^{(-9)}m$). C'est la lumière visible. Ainsi, lorsque vous effectuez une radiographie, vous ne voyez pas les rayons X émis autour de

vous. Vous ne voyez pas non plus d'ondes arriver dans votre téléphone portable !

Le corps noir : les problèmes commencent

Vous avez sans doute déjà observé une bougie. Vous avez alors remarqué que le bas de la flamme était bleu, alors que le haut de celle-ci était jaune-orangé. On sait depuis longtemps pourquoi : la température de la flamme est plus élevée en bas qu'en haut. On peut d'ailleurs évaluer la température d'un four en fonction de la couleur des braises dans celui-ci : une méthode bien connue des verriers. Mais pourquoi un corps chaud émet-il une couleur différente selon sa température ?

Cette question, quelqu'un se l'est posée et a décidé d'y répondre. Un Prussien (la Prusse est l'actuelle Allemagne) nommé Gustav Kirchhoff a entrepris en 1859 d'étudier ce phénomène lié à la chaleur.

En science, pour étudier un phénomène quel qu'il soit, il faut au préalable l'isoler. Dans notre cas, pour étudier les longueurs d'ondes émises par un corps chaud, il faut que le capteur utilisé ne mesure que les radiations émises par le corps étudié, et non celles d'autres émetteurs d'ondes électromagnétiques, celles du soleil par exemple.

Notion de corps noir

Dans cette optique, Kirchhoff imagine un matériau appelé corps noir. Il s'agit d'un matériau théorique qui absorberait toute forme de radiation lumineuse. Il est précisé « théorique » car un corps noir, tel que défini par les physiciens, ne peut pas réellement exister. Il s'agit d'un matériau idéal qui n'existe que dans notre imagination.

L'une des grandes réussites de Kirchhoff fut de recréer, dans une expérience, le comportement que l'on attend d'un corps noir grâce à des matériaux bien réels. Nous en reparlerons par la suite.

Revenons-en à la lumière. Lorsque de la lumière arrive sur un corps quelconque, plusieurs choses peuvent se passer :

- Soit la lumière est réfléchiée par le corps, c'est ce qui nous permet de voir tous les objets qui nous entourent.
- Soit la lumière est transmise par le corps, elle passe à travers. Le verre est un corps qui transmet la lumière.
- Soit la lumière est absorbée par le corps et elle est transformée, le plus souvent en chaleur. Ainsi le bitume d'une route absorbe la plupart des radiations qui lui viennent du soleil, et chauffe en conséquence.

Le corps noir imaginé par Kirchhoff absorbe toutes les radiations lumineuses, il apparaît donc noir (d'où son nom). Dans l'exemple précédent de la pomme rouge, nous constatons que la pomme absorbait toutes les radiations non-rouges et ne réfléchissait que le rouge. À contrario, un corps noir est un matériau qui ne réfléchit absolument aucune couleur. C'est pour cette raison qu'il apparaît totalement noir et n'émet naturellement aucune onde.

La seule manière de changer la couleur de ce corps noir est de le chauffer pour qu'il émette de la lumière directement. Étant donné qu'il absorbe toute l'énergie lumineuse qu'il reçoit, on peut être sûr que la lumière émise en le chauffant n'est pas due à la lumière que le corps noir réfléchit naturellement.

Une fois le phénomène isolé, Kirchhoff va pouvoir faire des mesures. Pour différentes températures, il va observer quelles longueurs d'ondes sont émises et en quelle abondance. Autrement dit, il va étudier les changements de couleurs du corps en fonction de sa température (bleu lorsqu'il est très chaud, etc.).

L'Expérience de Kirchhoff

Kirchhoff décide d'utiliser comme corps noir l'intérieur d'un four dont les parois sont opaques. Autrement dit, un four complètement fermé dans lequel la lumière ne peut pas rentrer. Kirchhoff perce tout de même une toute petite ouverture dans le four pour pouvoir observer à l'aide d'un capteur (plus précisément un spectromètre) le rayonnement électromagnétique à l'intérieur du four.

Pourquoi un four opaque agit-il comme un corps noir ? Pour une raison simple : la seule lumière que l'on capte dans ce four ne peut provenir que du four lui-même, puisque ses parois sont opaques. Ignorons la petite ouverture percée qui permet de faire des mesures, elle est négligeable dans le cadre de cette expérience.

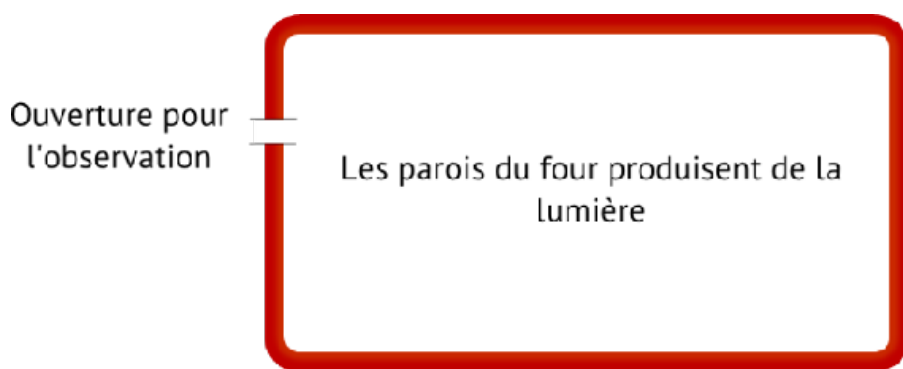


FIG. 3.14: schéma d'un four utilisé par Kirchhoff lors de son expérience

On peut donc assimiler le four à un corps noir. Kirchhoff a fait chauffer l'intérieur de toute une série de fours et à chaque fois, il a trouvé les mêmes résultats : quel que soit le four employé, pour une même température, on retrouve les mêmes couleurs. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

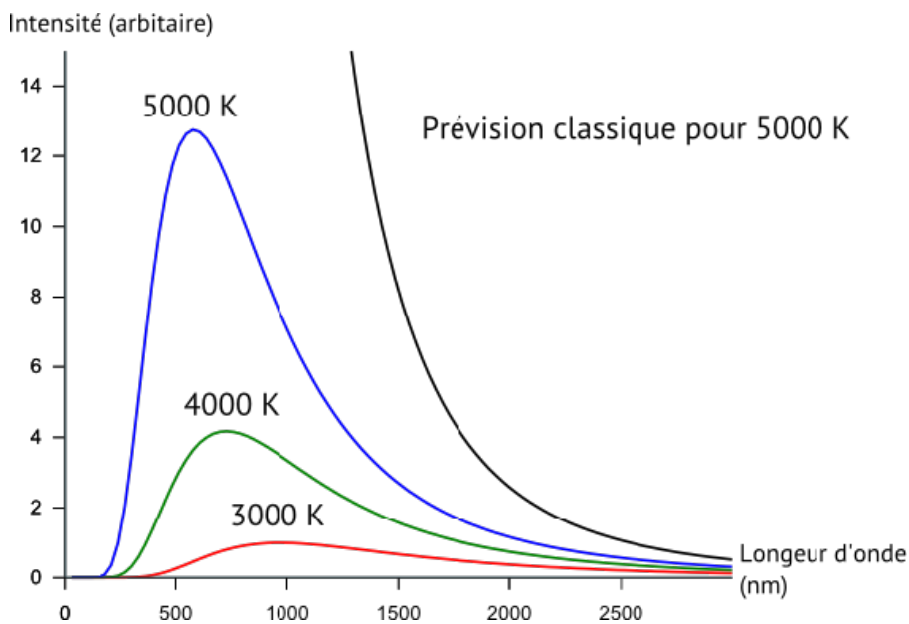


FIG. 3.15: Intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde.

$5000\text{ }^{\circ}\text{K (kelvin)} = 4\,726\text{ }^{\circ}\text{C (celsius)}$

$4000\text{ }^{\circ}\text{K (kelvin)} = 3\,726\text{ }^{\circ}\text{C (celsius)}$

$3000\text{ }^{\circ}\text{K (kelvin)} = 2\,726\text{ }^{\circ}\text{C (celsius)}$

La catastrophe ultraviolette

Ces résultats ne coïncident pas du tout avec les prédictions de la physique classique (courbe noire sur le schéma), plus précisément avec la loi de Rayleigh-Jeans.

D'après cette loi, l'énergie émise par un corps dans un domaine de longueur d'onde croît avec la fréquence. Autrement dit, un corps chaud émettra beaucoup de radiations dans les hautes fréquences, et beaucoup moins dans les basses fréquences. Cette affirmation ne colle pas avec les observations de Kirchhoff : lorsque l'on se rapproche des longueurs d'onde des ultraviolets (inférieures à 400 nm), l'énergie émise dans ce domaine est censée être phénoménale, mais elle est en réalité très basse. On nommera ce problème la catastrophe ultraviolette.

Lorsque Lord Kelvin dira « Il reste deux petits nuages dans le ciel serein de la physique théorique », le plus gros nuage dont il parle est celui du rayonnement du corps noir.

Ainsi, il y a un problème. Comment le résoudre ? Einstein va encore une fois se montrer bien utile...

« Ce qui est incompréhensible, c'est que le monde soit compréhensible. » Albert Einstein.

Ce qu'il faut bien comprendre

- La lumière a longtemps fait débat dans la communauté scientifique : est-ce une onde ou un flot de particules ?
- L'expérience d'Young a démontré que la lumière a une nature ondulatoire.
- Un certain Kirchhoff a étudié le rapport entre la température d'un corps et sa couleur (par exemple une flamme). Ses recherches donnèrent aux physiciens assez de données pour chercher des solutions au problème de la catastrophe ultraviolette.

Kirchhoff ne se doutait pas qu'il allait participer à une véritable révolution en menant son expérience. Les plus grands physiciens de l'époque se sont penchés sur son problème.

Au fur et à mesure des découvertes, de nouvelles incohérences apparaissaient. C'était sans compter sur l'aide précieuse d'Einstein qui réussit à remettre de l'ordre dans tout ce chahut.

La quantification de l'énergie

Le problème posé par le corps noir peut paraître bien anodin, mais les physiciens n'aiment guère laisser les choses au hasard. Un grand physicien allemand, Max Planck, décide de résoudre le problème une bonne fois pour toutes. Il est professeur d'université renommé, et de plus spécialiste en thermodynamique.

La loi de Planck

Pendant six mois, il va travailler sur le sujet sans trouver de solution, jusqu'à ce qu'il trouve par hasard une loi qui porte désormais son nom.

Comme vous le savez, la physique tend à décrire le monde d'une façon purement mathématique. Dans les yeux d'un physicien, il est possible de résumer parfaitement le comportement de n'importe quel objet par une série d'équations. Chaque scientifique apporte sa pierre au grand édifice de la physique théorique, le but étant bien entendu de faire coïncider tous les éléments de l'assemblage. Mais comment fait-on pour faire « coïncider » des équations ?

Une loi physique relie des grandeurs (la masse et l'énergie par exemple), et il est souvent nécessaire d'incorporer des constantes dans ces lois pour qu'elles soient vérifiées. La plupart du temps, ces constantes reflètent un phénomène naturel.

Par exemple, la constante qui fait le lien entre la masse d'une particule à l'énergie dont elle dispose potentiellement est le carré de la vitesse de la lumière dans le vide : $E = mc^2$. Étonnamment, le nombre de constantes utilisées en physique est relativement petit, et lorsque de nouvelles lois sont découvertes, elles peuvent ainsi facilement être reliées aux autres.

Depuis 1983, le mètre est défini en fonction de la vitesse de la lumière.

C'est la distance que celle-ci parcourt en un 299 792 458ème de seconde.

Dans le cadre de ses recherches, Planck s'est servi d'un maximum de constantes « naturelles » classiques (comme la constante c), mais il a dû insérer une constante nouvelle h , dont la valeur est infiniment petite : $6,626068 \cdot 10^{(-34)} J.s^{-1}$.

Et cette constante a un rôle particulier, dans la mesure où l'on peut tirer de la loi de Planck la relation suivante :

$$E = N \times h\nu$$

Avec un N entier, h une constante inventée par Planck, et ν la fréquence du rayonnement électromagnétique. E est l'énergie totale dissipée par le corps noir chaud.

Petit à petit, les scientifiques comprirent la signification physique de cette relation : la matière chaude, voulant rejeter de l'énergie, va le faire sous forme de petits « paquets » indivisibles de lumière.

Une métaphore pour expliquer ce phénomène pourrait être de considérer le rayonnement du corps noir comme du sable qui passe d'un bulbe à l'autre d'un sablier. De loin, on a l'impression que le transfert se fait de façon continue : le sable coule comme un flux ininterrompu. Mais en se rapprochant du sablier, nous sommes bien obligés de reconnaître que le transfert se fait grain par grain très rapidement, et donc de manière discontinue. De même, lorsqu'un corps dissipe de l'énergie par rayonnement, ce transfert se fera de façon discontinue, par petits paquets d'énergie appelés quanta.

Tout cela doit vous paraître tout à fait anodin. Oui mais voilà, il y a un vrai problème : les lois fondatrices de la thermodynamique dictent qu'un corps ne peut émettre de la lumière seulement d'une manière continue. Cette découverte remet la thermodynamique en cause ! À

l'époque, c'est très déstabilisant. Planck lui-même ne croira pas à sa propre théorie et dira même qu'il s'agit d'un « artifice mathématique ». Il mettra des années à s'en remettre...

Planck avait appelé sa constante h comme *hilfe* (« aide » en allemand) : il avait en effet besoin d'une aide pour que sa formule corresponde aux résultats expérimentaux. Aujourd'hui, on a l'habitude d'appeler h la « constante de Planck ».

Le phénomène photoélectrique

En quoi consiste ce phénomène ?

Lorsqu'il découvre les travaux de Planck, Einstein se demande si la théorie corpusculaire de la lumière (qui considère la lumière comme un ensemble de particules et non pas comme une onde) n'a finalement que du mauvais... Et si les quanta du rayonnement du corps noir étaient en fait des particules ? C'est ce qu'on pourrait croire ! Einstein va alors se pencher sur la question et étudier un phénomène appelé l'effet photoélectrique.

En 1888, Heinrich Hertz, en travaillant sur la télégraphie, s'aperçoit par hasard que lorsque l'on dirige de la lumière sur un métal, celui-ci produit de l'électricité. Ce principe est toujours utilisé aujourd'hui dans les panneaux photovoltaïques. Un autre scientifique appelé Philipp Lenard décide d'étudier le phénomène et de calculer la quantité d'énergie produite en fonction de la longueur d'onde (ou de la fréquence) de la lumière que reçoit le métal. Les résultats sont les suivants :

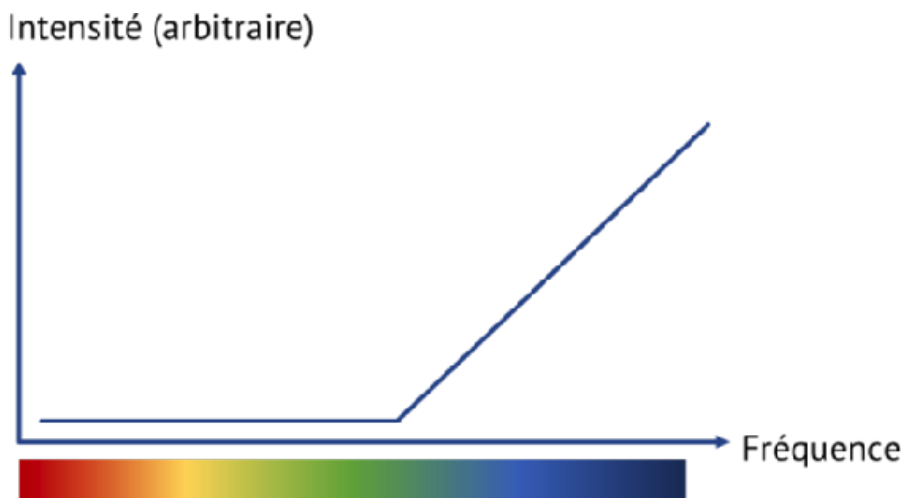


FIG. 4.1: *quantité d'énergie électrique produite en fonction de la fréquence de lumière projetée sur le métal*

Lorsque la fréquence du rayonnement électromagnétique est trop faible, rien ne se passe, quelle que soit l'intensité de la lumière.

Einstein découvrira pourquoi. Il y a bien sûr dans le métal des électrons, comme partout ailleurs. Ces derniers peuvent être arrachés au métal lorsqu'on leur transmet une énergie supérieure à celle qui les lie à ce dernier. Lorsqu'une lampe envoie de la lumière blanche sur le métal (et par conséquent des quanta), il y aura des quanta peu énergétiques (rouges) et des quanta énergétiques (bleus).

Les quanta les plus énergétiques vont réussir à arracher des électrons au métal, contrairement aux quanta moins énergétiques. C'est comme si vous essayiez de bouger une boule de pétanque avec d'autres balles de différentes natures : ça ne marchera pas avec une balle de ping-pong mais ça marchera très bien avec une balle de bowling !

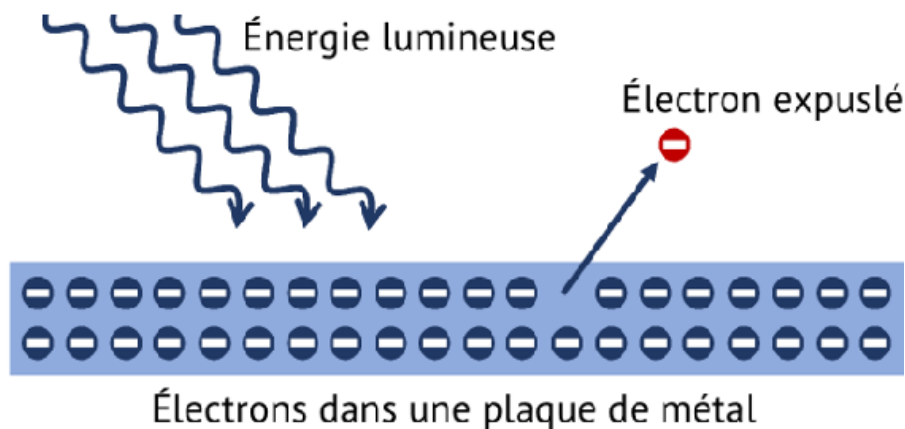


FIG. 4.2: Des électrons sont arrachés à un métal par phénomène photoélectrique

La découverte des photons

Si la lumière peut créer du courant dans un métal, cela veut dire qu'elle peut transmettre de l'énergie. Or, dans les modèles de la physique classique, une onde électromagnétique n'est pas censée avoir cette propriété.

La lumière doit donc être considérée comme corpusculaire, c'est-à-dire composé de particules. Einstein appelle ces particules « quanta de lumière », et le chimiste américain Gilbert Lewis les rebaptisera « photons ».

La dualité onde-particule

Entre corpuscules et ondes

Young avait bel et bien prouvé que la lumière agissait comme une onde, mais Einstein commençait à se convaincre du contraire.

Personne ne croira Einstein, même Planck dira « Il ne faut pas trop lui tenir rigueur de ce que, dans ses spéculations, il ait occasionnellement pu dépasser sa cible, comme avec son hypothèse des quanta de

lumière. »

Pourtant, le raisonnement est bon : la lumière est à la fois une particule et une onde. Une métaphore couramment employée est celle du cylindre : si l'on regarde un cylindre de haut et de côté, les figures observées seront un rectangle et d'un cercle. Le cylindre n'est ni un rectangle ni un cercle, mais quelque chose de plus complexe. Comme le photon. La particule et l'onde sont une manière de voir le photon. Il n'en est pas un(e) pour autant. Ce paradoxe s'appelle la dualité onde-particule.

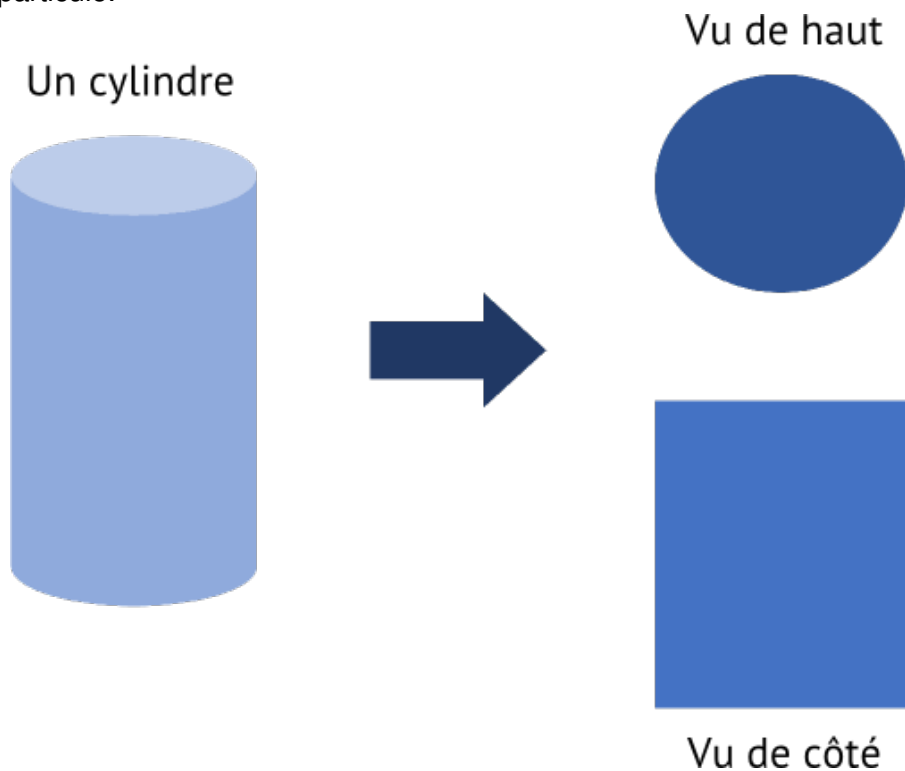


FIG. 4.3: *une manière astucieuse de comprendre la dualité onde/particule*

La dualité onde-particule étendue à toutes les particules : l'hypothèse de De Broglie

Un physicien français, Louis de Broglie (prononcez « de Breuil ») va même prouver que toute particule en mouvement peut être associée à

une onde : la dualité onde-particule peut s'étendre à tout objet, de l'électron à la balle de bowling.

Un système particulier

En 1905, et dans le cadre de la théorie de la relativité restreinte, Einstein (entre autres) émit l'hypothèse que, à chaque particule (de l'électron à un ballon par exemple) est associée une quantité précise d'énergie. Une particule de masse m dispose d'une énergie proportionnelle à sa masse, telle que :

$$E = mc^2$$

E est l'énergie d'une particule de masse m , c est la vitesse de la lumière. Et encore, cette formule célèbre n'est valable que si la particule est immobile et a une masse. La formule $E = mc^2$ est un cas particulier dont le cas général s'écrit :

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

Sachant que p est la quantité de mouvement, c'est-à-dire une donnée qui prend en compte masse et vitesse d'une particule. Pour une particule massive (qui a une masse), la quantité de mouvement est décrite par la formule suivante :

$$p = mv \gamma \text{ avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

γ est appelé le facteur de Lorentz, très utilisé dans le contexte de la relativité générale.

En simplifiant la formule précédente, on trouve :

$$E = \gamma mc^2$$

Rappelons que Planck avait émis dans le cadre de ses recherches

sur le corps noir la formule suivante :

$$E = h \nu$$

avec cette fois-ci E étant l'énergie associée à un photon. Et si ces deux formules étaient généralisables ? On pourrait alors écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \gamma mc^2 \\ E = h \nu \end{array} \right.$$

Ce qui équivaut à :

$$\lambda = \frac{h}{p \gamma}$$

On a déjà prouvé que le photon est à la fois une onde et une particule. Cette formule semble démontrer que si une particule est dotée d'une quantité de mouvement, alors elle peut également être décrite comme une onde de longueur d'onde λ . La dualité onde-particule serait alors étendue à toutes les particules. Mais ceci est-il possible ?

Louis de Broglie a établi cette formule en partant de l'hypothèse d'une corrélation entre deux expressions de l'énergie, mais sans savoir si cette association est légitime. La question qui se pose alors est : est-ce que cette formule a une réalité physique, ou n'est-ce qu'un « artifice mathématique » ?

L'hypothèse de Louis de Broglie

Si Louis de Broglie n'a aucune idée de la validité de sa théorie, et encore moins une preuve expérimentale, il décide tout de même de présenter ses calculs dans sa thèse « Recherches sur la théorie des

quanta ». Le jury qui doit valider sa thèse ne sait que dire devant des arguments si étranges. Ont-ils affaire à un génie ou à un farfelu ?

Ils demandent, par l'intermédiaire du physicien Paul Langevin, l'avis d'Einstein. La réponse ? « Il a soulevé un coin du grand voile... »

Ces quelques mots suffisent à rassurer les membres du jury qui accordent à Louis de Broglie sa thèse avec félicitations. Le résultat

$\lambda = h/p \gamma$ peut se simplifier en deux cas :

- Si la particule est de masse nulle (un photon par exemple) on fait abstraction du facteur γ , et alors $\lambda = h / p$, soit $\lambda = hc / E$ car pour une particule de masse nulle, $p = E / c$.
- Si la particule est de masse non nulle, $\lambda = h/p \gamma$ soit $\lambda = h/mv \times \sqrt{(1 - v^2/c^2)}$

Encore fallait-il vérifier expérimentalement l'égalité, et ainsi prouver une fois pour toutes que l'hypothèse de De Broglie n'est pas qu'un artifice mathématique.

Comme nous l'avons vu précédemment, un moyen de prouver la nature ondulatoire d'un corps est de l'associer à un phénomène d'interférences. Les cristaux peuvent diffracter des ondes et par conséquent donner naissance à des figures d'interférences. Pour démontrer que des particules ont une nature ondulatoire, il suffirait de prouver que l'on peut obtenir une figure d'interférences en bombardant des cristaux avec ces dites particules. En 1927, Clinton Davisson et Lester Germer bombardèrent des cristaux de nickel avec des électrons, le tout devant des capteurs.

Au lieu de trouver une répartition homogène des impacts des électrons derrière les cristaux, les capteurs mirent en évidence des figures d'interférence. Les électrons ont donc bel et bien une nature ondulatoire, et chaque électron a une onde associée, liée à sa masse.

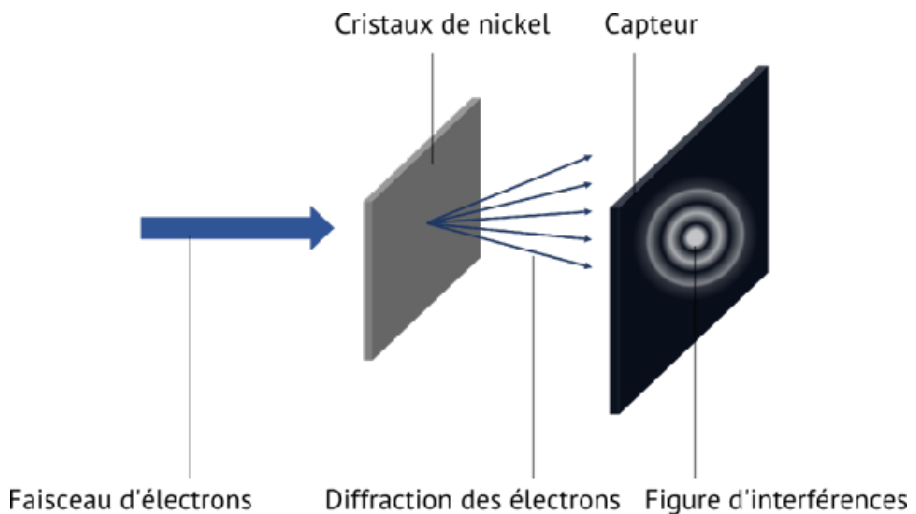


FIG. 4.4: l'expérience de Davisson et Germer

Alors, si l'on peut vérifier la loi avec un électron, peut-on la vérifier avec des objets plus grands, comme un atome, une molécule, une chaise ou un chat ? Théoriquement oui si l'on en croit cette formule :

$$\lambda = \frac{h}{mv} \times \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Cependant, lorsque m est relativement grand, la longueur d'onde devient trop petite et indétectable par la plupart des capteurs. Les effets quantiques s'effacent donc pour les « gros » objets. L'objet le plus volumineux avec lequel la loi de De Broglie a été vérifiée est une molécule de fullerène, de formule C_{60} .

La naissance de la physique quantique

Planck va finalement digérer sa découverte. Malgré lui, il vient de bouleverser la physique. Il apparaît que l'infiniment petit n'obéit pas aux mêmes lois que le monde macroscopique. Au fur et à mesure du temps, comme nous allons le voir, l'infiniment petit s'avérera bien étrange, si bien qu'au milieu du XXe siècle, certains scientifiques décident de diviser la science en deux branches.

1. La Physique Classique : elle regroupe l'ensemble des découvertes faites avant la fin du XIXe siècle, ne traitant pas de l'infiniment petit, mais s'appliquant très bien au niveau macroscopique et à l'univers. Ses théories emblématiques sont la mécanique newtonienne et la théorie de gravitation universelle, les différentes lois de la thermodynamique et les équations de Maxwell sur l'électromagnétisme.
2. La Physique Quantique : Ce nom vient bien évidemment de l'événement fondateur de cette nouvelle branche, la découverte des quanta. Ce sont les lois plus modernes, s'appliquant à l'infiniment petit.

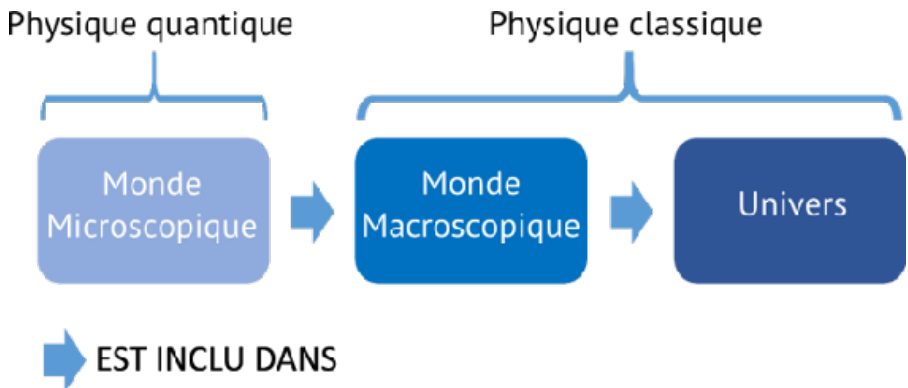


FIG. 4.5: La physique classique ne peut pas décrire efficacement l'infiniment petit, monde de la physique quantique.

Mais si la physique quantique va devenir une branche à part entière de la physique, ce n'est pas uniquement pour cette découverte : l'infiniment petit se révélera différent du monde classique pour nombre de raisons ! La lumière nous révélera d'ailleurs d'autres étrangetés de ce nouveau monde.

« La science cherche le mouvement perpétuel. Elle l'a trouvé : c'est elle-même. » Victor Hugo.

Ce qu'il faut bien comprendre

- En partant du problème soulevé par Kirchhoff et ses fours, les physiciens découvrirent que la lumière est toujours émise de façon quantifiée, par petits paquets.
- Einstein montra que la lumière possède effectivement une nature corpusculaire.
- La lumière est donc une onde ET un flot de particules. Il s'agit du premier paradoxe de la physique quantique.
- De Broglie émit l'hypothèse un peu folle que toutes les particules possèdent cette dualité onde/particule.
- Les phénomènes quantiques (comme la dualité onde/particule) disparaissent à notre échelle. Leur étude n'est possible que dans l'infiniment petit, à l'échelle de l'atome.

Ces découvertes nous amènent à sauter pieds joints dans l'atome et ses particularités. Étudions plus amplement l'un des composants de l'atome : l'ensemble des électrons. À quoi servent-ils ? Comment se comportent-ils ? Comment peut-on les étudier ?

Le modèle de Bohr

Encore une fois, nous allons voir que c'est en cherchant naïvement la réponse à un problème qui paraissait bien anodin que les scientifiques firent de grandes découvertes au sujet des atomes.

Au début du XIXe siècle, Bohr étudia le comportement des électrons qui gravitent autour du noyau de chaque atome. C'est seulement 20 ans plus tard que Chadwick présenta le modèle atomique simplifié que nous avons vu précédemment (partie 1, chapitre 2, figure 13).

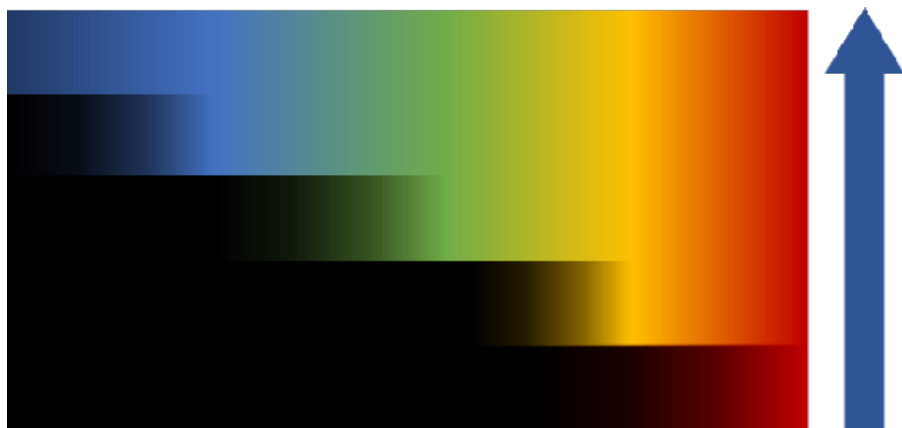
Voyons comment Bohr en est venu à étudier le comportement de ces fameux électrons, qui sont au cœur de tous les problèmes quantiques.

Le modèle électronique de Bohr

Comment produire de la lumière ?

Notion de spectre

Lorsque l'on chauffe certains gaz, on obtient des résultats étonnants, une lumière verte ou jaune par exemple. Pour étudier ces comportements, Joseph Von Fraunhofer construisit en 1814 le premier spectroscope, un microscope associé à un prisme qui permettait de voir quelles longueurs d'onde étaient émises par un gaz. On appelle en effet « spectre » le graphique qui répertorie les différentes longueurs d'onde émises par un objet. Pour des objets chauds tels que le soleil ou des ampoules à incandescence, il observait des spectres continus.



Température

FIG. 5.1: les différentes couleurs émises par des corps en fonction de leur température

Mais lorsqu'il regarda à travers le spectroscope ces gaz chauffés, il ne vit non pas un spectre continu, mais une série de raies, comme on peut le voir sur ces schémas :

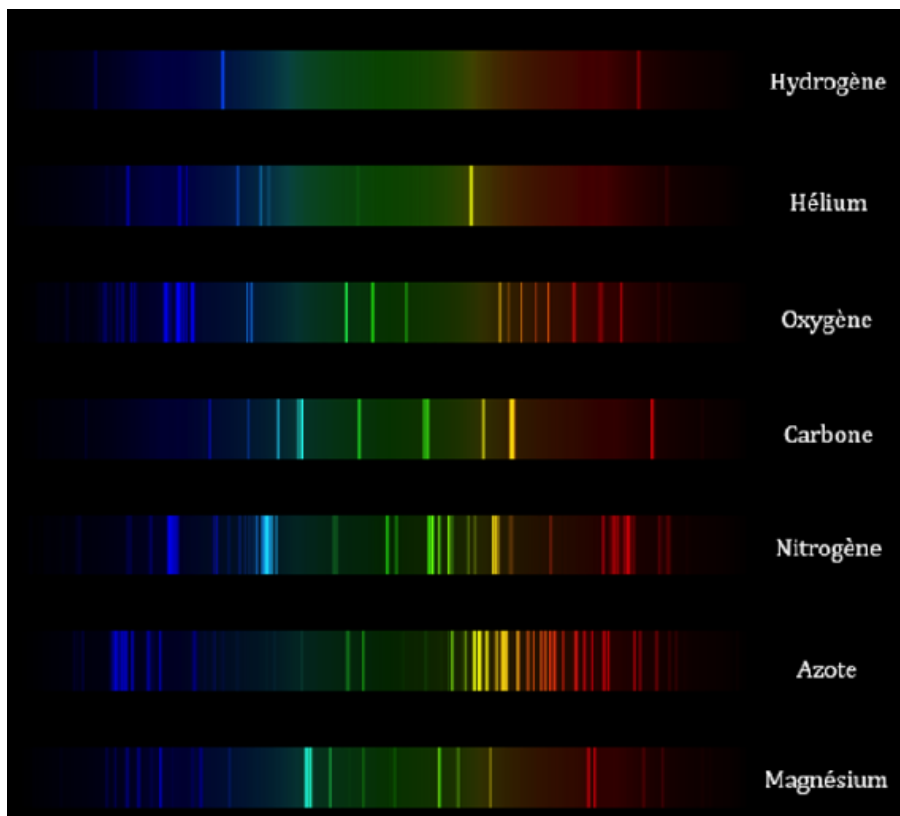


FIG. 5.2: Spectres d'émission pour différents gaz chauffés

De plus il découvrit que chaque gaz était toujours associé aux mêmes raies, constituant en quelque sorte un code-barres, avec un code différent pour chaque gaz.

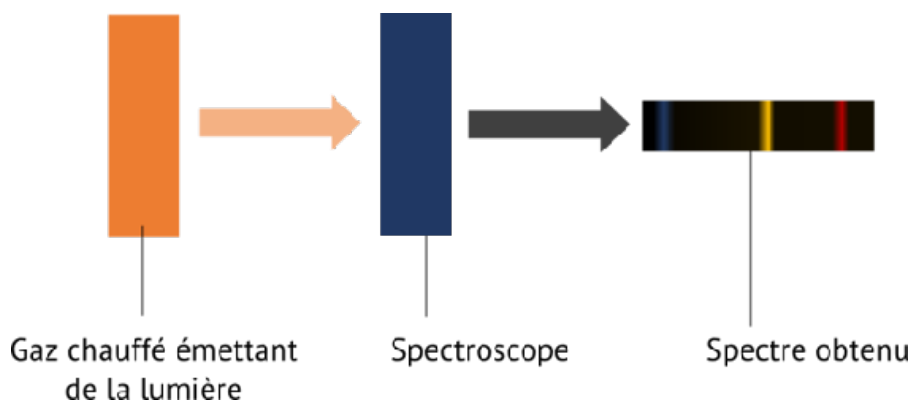


FIG. 5.3: *Obtention d'un spectre d'émission à partir d'un gaz chauffé*

Raies de l'hydrogène

Certains scientifiques décidèrent de chercher l'origine de ces raies caractéristiques. Anders Jonas Angström se pencha en 1862 plus particulièrement sur le spectre de l'hydrogène, le plus simple, car n'ayant que quatre raies. Avec des mesures, il trouva la longueur d'onde de chacune des raies :

○ Raie 1 : 656,3 nm

○ Raie 2 : 486,1 nm

○ Raie 3 : 434,0 nm

○ Raie 4 : 410,1 nm

La formule de Balmer

Si Angström ne trouva pas la raison pour laquelle les gaz n'émettaient que certaines longueurs d'onde, il en mesura avec grande précision les fréquences. Ces mesures aidèrent Johann Balmer à placer la première pièce du puzzle : avec un travail minutieux, purement empirique, il trouva la formule suivante :

$$\lambda = \frac{1}{\left(R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}\right)\right)}$$

R_H est une constante, et n est le numéro de la raie. Ainsi, avec $n = 1$,

vous aurez la longueur d'onde de la première raie. n prendra comme valeur 1, puis 2, 3, 4, etc.

La provenance des raies : le postulat de Bohr

Il y a donc dans le spectre visible un nombre précis de raies pour chaque élément. Pour Niels Bohr, cet ensemble fini de valeurs (on parle de valeurs discrètes) est dû à un problème de stabilité de l'atome.

Le noyau d'un atome est de charge positive, un électron est de charge négative. L'électron ne devrait-il pas être attiré par le noyau ? Si l'on suit les lois classiques de l'électromagnétisme, on trouve en effet que la structure de l'atome devrait s'effondrer quasi instantanément. Pourtant, nous sommes là ! Les lois classiques ne s'appliquent donc pas pour l'infiniment petit.

Bohr, en collaborant avec Rutherford, émet un postulat, c'est-à-dire qu'il fait une série d'affirmations qu'il est incapable pour le moment de démontrer.

1. La physique des particules est différente de la physique au niveau macroscopique : il faut trouver des lois différentes pour la physique quantique.
2. Les électrons ne peuvent se situer que sur des orbites bien définies, et à chacune de ces orbites est associée une quantité d'énergie que possèdent les électrons : les orbites sont quantifiées. Plus l'orbite est basse, plus elle est stable.
3. Les électrons ne peuvent pas acquérir ou perdre de l'énergie en changeant d'orbite. Cette acquisition ou perte d'énergie se fait de façon photonique.

Éclaircissons ce postulat.

Les orbites

Les électrons se placent donc sur des orbites. Chacune de ces orbites potentielles se voit attribuer une « énergie » : E_1 , E_2 , etc.

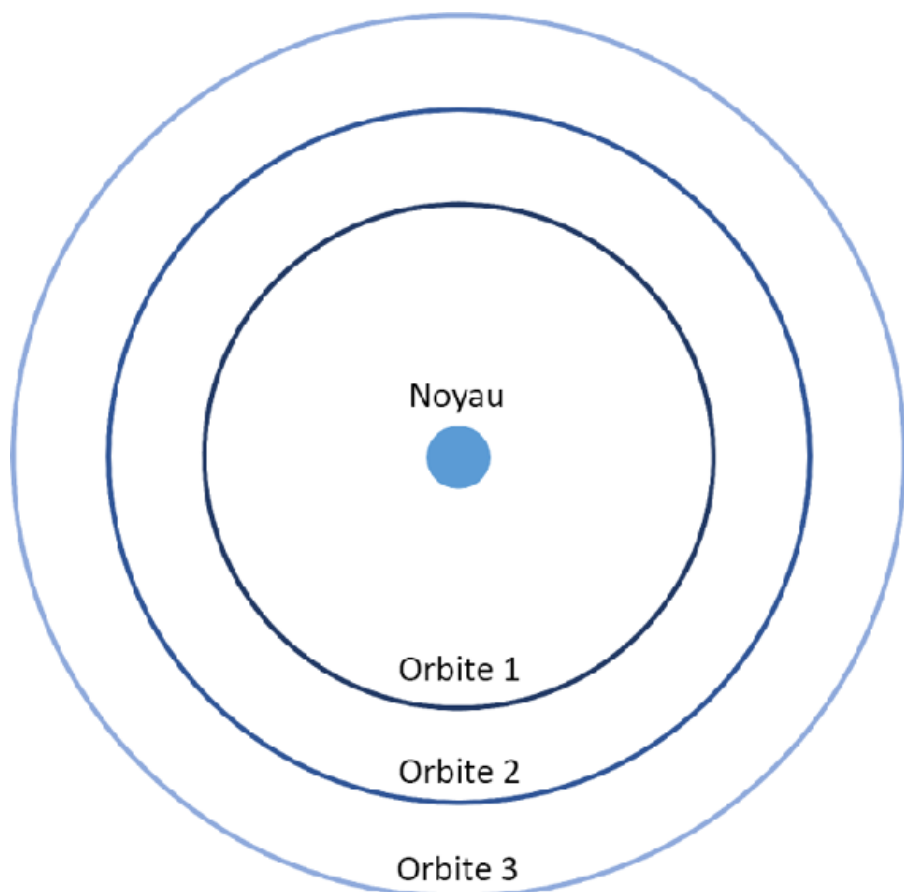


FIG. 5.4: un atome et son noyau avec ici 3 orbites

En considérant E_1 comme l'orbite la plus stable, la moins énergétique (dite fondamentale), l'unique moyen pour un électron de passer d'une orbite stable à une orbite de niveau supérieure (donc instable) est de recevoir sous la forme d'un photon l'énergie nécessaire E pour que celui-ci passe à un niveau d'énergie plus élevé, soit :

$$E = \Delta E = E_2 - E_1$$

D'après la loi de Planck, ce photon aura une fréquence $\nu = E / h$. Ce phénomène s'appelle l'absorption.

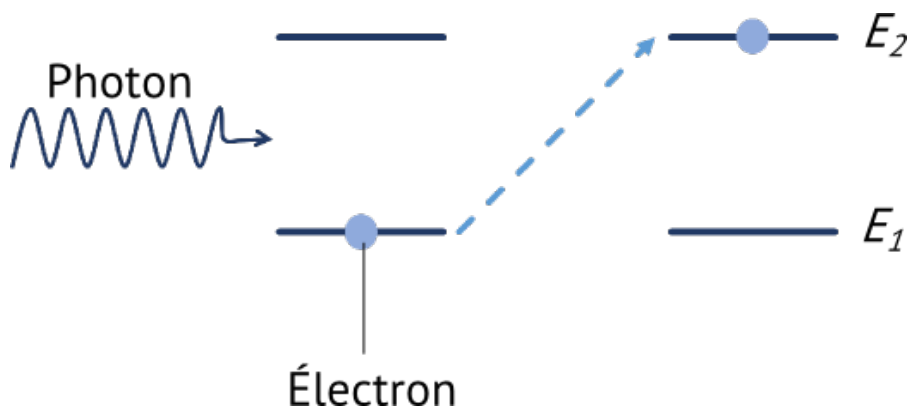


FIG. 5.5: Absorption d'un photon par l'électron qui se change d'orbite

Dans cette situation, l'électron s'éloigne du noyau en changeant de couche. Et malheureusement il n'aime pas ça. On dit qu'il est dans un état « instable » ou « excité ». Il va donc chercher à reprendre sa place près du noyau. Pour cela il doit perdre de l'énergie, de la même manière qu'il en a reçue. L'atome va alors émettre un photon dans une direction aléatoire de fréquence : $\nu = E / h$. C'est l'émission spontanée.



FIG. 5.6: Émission spontanée d'un photon lorsque l'électron reprend sa place à l'orbite fondamentale.

Mais en quoi cela explique-t-il les raies des spectres lumineux de nos gaz chauffés ? En fait, il n'y a pas seulement 2 niveaux d'excitation contrairement à ce qu'illustrent les schémas précédents. Il y en a bien plus.

Pour l'hydrogène et dans le spectre du visible, il y en a 4. Il y en a bien plus dans l'infrarouge et l'ultraviolet. C'est parce que les orbites sont quantifiées (on peut compter le nombre d'orbites possibles) que le nombre des raies est lui aussi quantifiable et dénombrable.

Les nombres quantiques

Pour décrire ces transitions énergétiques, Bohr s'appuya sur les modèles atomiques de l'époque. Si ces modèles atomiques étaient très beaux, et montraient avec les orbites un lien parfait entre l'infiniment grand et l'infiniment petit, on s'aperçut bien vite que l'organisation des orbitales dans l'atome est plus complexe.

Au fur et à mesure du temps, le modèle se précisa, et l'on découvrit comment les électrons se positionnaient vraiment autour du noyau. Ces modèles avancés montrèrent que les électrons pouvaient évoluer d'un certain nombre de façons bien précises. Bohr démontra que l'on peut décrire l'état d'un électron autour du noyau avec quatre nombres, appelés « nombres quantiques ». Ces nombres ne peuvent prendre qu'un nombre fini de valeurs, et par conséquent les électrons ne peuvent s'agencer que d'un nombre précis de façons autour du noyau.

Le premier nombre quantique : n

Tout d'abord, il faut dire que l'intuition de Bohr était bonne : les électrons se placent bien sur les orbites, que l'on numérote 1, 2, 3, 4, etc. On les note d'ailleurs le plus souvent avec des lettres : K, L, M, N, etc.

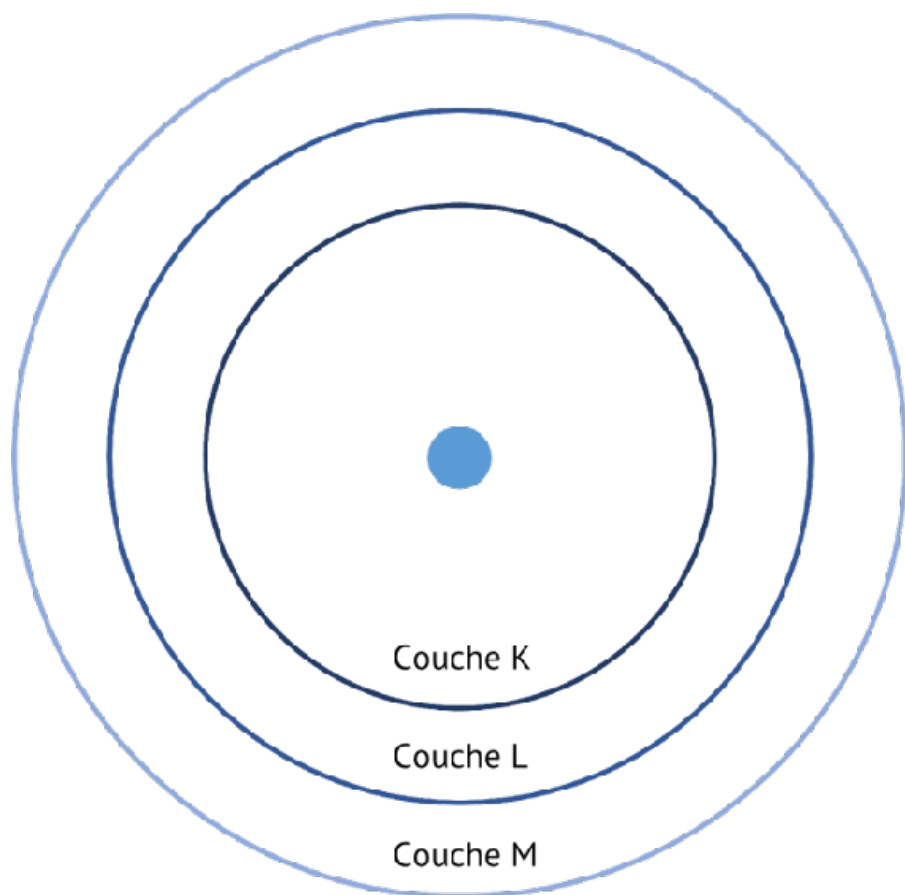


FIG. 5.7: un atome et 3 couches électroniques

Le second nombre quantique : L

En 1915, le physicien allemand Arnold Sommerfeld découvre que dans chaque couche électronique, il y a un certain nombre de sous-couches électroniques, également appelées orbitales (à ne pas confondre avec les « orbites » de Bohr).

Il y a n sous-couches électroniques dans une couche électronique. En effet, une sous-couche est définie par un nombre, L (un entier), avec $0 \leq L \leq n - 1$.

Par exemple, pour $n = 2$, il y a dans la couche électronique L deux

orbitales, une avec $L = 0$ et une avec $L = 1$.

Ces deux sous-couches ont un nom :

- ☐ s (de *sharp*) pour $L = 0$
- ☐ p (de *principal*) pour $L = 1$
- ☐ d (de *diffuse*) pour $L = 2$
- ☐ f (de *fundamental*) pour $L = 3$

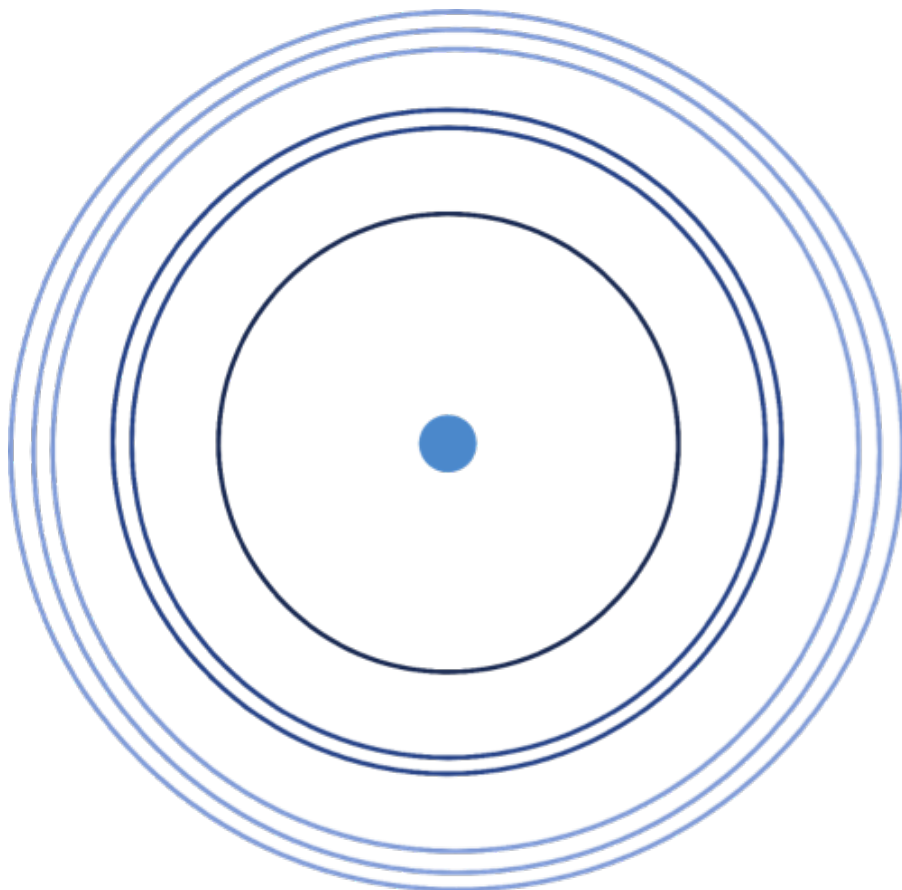


FIG. 5.8: un atome avec ses couches et sous-couches

Le troisième nombre quantique : m

Sommerfeld démontrera également que les orbitales peuvent s'orienter dans l'espace. Dans chaque sous-couche électronique, il existe $2L+1$ façons pour l'orbitale de se positionner, selon un nombre m avec $-L \leq m \leq +L$

Le quatrième nombre quantique : le nombre de spin s

Pour couronner le tout, l'électron, en plus de pouvoir occuper tous ces emplacements, tourne sur lui-même, soit sans un sens, soit dans l'autre. On définit cette rotation avec le nombre quantique de spin s défini en 1923 par Wolfgang Pauli. Ce nombre est le moment cinétique intrinsèque de l'électron.

En savoir plus sur le moment cinétique

Le moment cinétique est la force par laquelle un objet tourne. Pour faire tourner une toupie par exemple, on doit l'imprégner d'une énergie, d'un moment cinétique, qui s'épuise au fur et à mesure du temps.

L'importance de cette force est proportionnelle à la masse et à la vitesse de rotation de l'objet : une toupie reste « debout » plus longtemps lorsque vous la faites tourner vite.

Le spin d'un électron peut prendre deux valeurs. Ces spins sont respectivement appelés « up » et « down » :

$$+\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi} \text{ et } -\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$$

Note : $\frac{h}{2\pi}$ peut se simplifier par le nombre h , la constante de Dirac

ou constante de Planck réduite. Souvent, on abrège la valeur du spin à $1/2$ ou à $-1/2$, la constante de Dirac étant sous-entendue.

Avec ces quatre nombres quantiques (n, L, m, s), il est possible de décrire précisément l'état d'un électron autour du noyau.

Le principe d'exclusion de Pauli

C'est alors que Pauli se demanda pourquoi tous les électrons ne se réfugiaient pas dans la couche électronique la plus basse, c'est pourtant celle avec le niveau d'énergie le plus bas ! C'est alors qu'il émit le principe suivant :

« Dans un atome, deux électrons ne peuvent avoir le même état quantique, c'est-à-dire les mêmes nombres quantiques. »

$$\text{Exemple : } n=2; l=1; m=0; s=+\frac{1}{2}\hbar$$

En connaissant tout cela, on peut connaître le nombre maximum d'électrons dans une couche électronique : il est égal à $2n^2$, soit 2 pour K, 8 pour L et 18 pour M, etc.

La mécanique quantique et la vision de l'atome commencent donc à s'assortir de modèles et de lois bien particulières. Le postulat de Bohr stipule d'ailleurs que les lois et modélisations de la physique quantique devaient être bien séparées de la physique classique. Le temps ne fera que conforter cette vision des choses.

Une application de ces découvertes : les lasers

Vous en avez tous déjà vu, dans les films, en médecine, dans des industries pour certains, dans des centres militaires pour d'autres. Les lasers sont présents partout, ouvrez votre lecteur CD pour en avoir la preuve : c'est un laser qui permet de lire vos données gravées sur un disque.

On a l'habitude d'écrire laser, mais la véritable graphie est L.A.S.E.R. Laser est en effet un acronyme qui veut dire en anglais :

LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION

Soit en français « amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement ». Nous avons déjà parlé d'émission spontanée de lumière, lorsqu'après l'absorption d'un photon par un atome, un autre photon aux mêmes caractéristiques est émis dans une direction aléatoire. Cette émission se fait après un certain laps de temps, mais sachez qu'il est possible de provoquer la libération d'un photon avant que ce temps soit écoulé en poussant un peu l'atome. L'émission n'est plus spontanée mais « stimulée ».

L'émission stimulée

Prenons un atome dans son état excité. Mettons qu'il n'ait toujours pas émis spontanément son surplus d'énergie par émission spontanée.

Il se trouve que si un photon vient toucher cet atome, celui-ci va le stimuler et provoquer sa désexcitation. Le photon alors émis va rejoindre celui qui a stimulé l'atome. Les deux photons vont évoluer dans la même direction, « doublant » ainsi la puissance du faisceau.

C'est Einstein qui découvrit en 1917 ce principe de l'émission stimulée. Notez que pour que celle-ci se fasse, il faut que les deux photons (incident et émis) soient de même longueur d'onde.



FIG. 5.9: Émission stimulée d'un photon

La technique Laser

Des découvertes en physique théorique qui peuvent au premier abord apparaître comme inutiles dans notre vie vont souvent, avec le temps, trouver des applications pratiques. Certaines de ces applications ont révolutionné notre monde, et tel fut le cas pour le laser. Voyons de quels éléments un laser est composé.

Le pompage optique

Imaginez une population d'atomes. Ils sont tous dans leur état stable, non excités.



FIG. 5.10: Atomes non excités, stables

Maintenant, imaginez que l'on dirige sur ces atomes une source de lumière, de sorte que chacun des atomes se retrouve dans un état excité. On dit que la population d'atomes est inversée. Ce procédé qui consiste à inverser une population d'atomes grâce à de la lumière s'appelle le pompage optique.

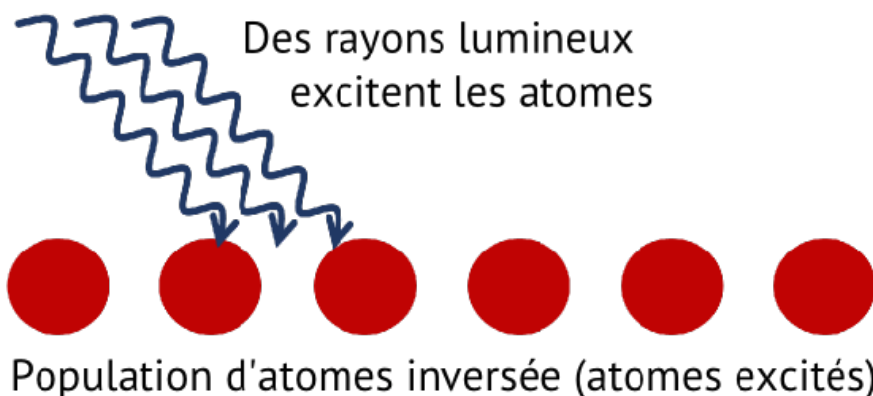


FIG. 5.11: système de pompage optique

Amorçage du processus

Plaçons nos atomes dans un tube. Ils ne vont pas rester dans cet état excité indéfiniment : à un moment, certains atomes vont émettre une radiation lumineuse par émission spontanée, dans une direction aléatoire.

Il arrivera un moment où, par chance, un des photons émis va sortir du tube sans en toucher les bords, en venant percuter les autres atomes de la population, les désexcitant par émission stimulée. Un groupe de photons va alors sortir du tube en même temps (on dit qu'ils sont en phase), tous dans la même direction.

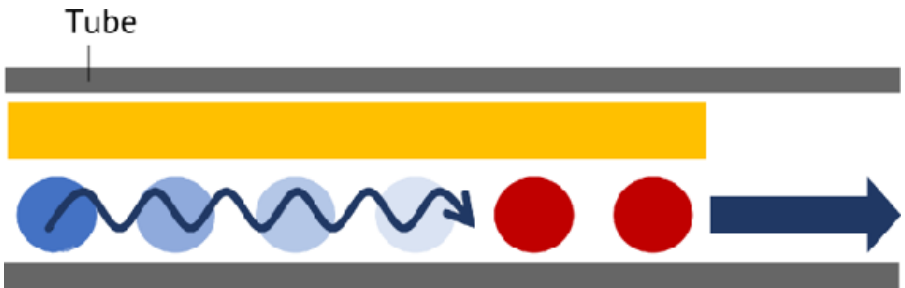


FIG. 5.12: un électron se désexcite et cause des émissions stimulées en chaîne

Pourtant, il ne faut pas oublier notre système de pompage optique. En effet, dès qu'un atome est désexcité, notre système de pompage optique le ré-excite.

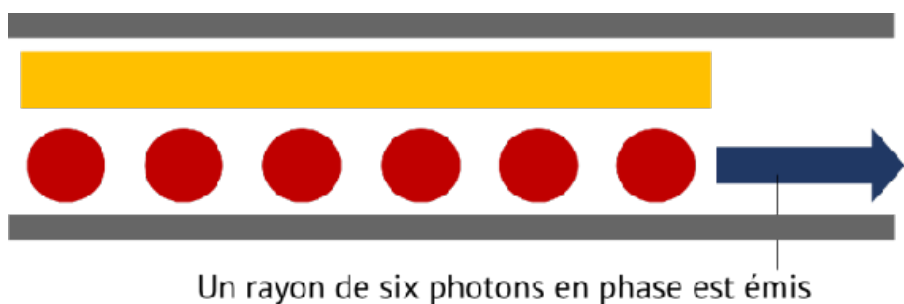


FIG. 5.13: les atomes dans le tube sont à nouveau excités par le système de pompage optique.

Amplification du rayonnement

Maintenant, plaçons à chaque extrémité du tube un miroir, qui réfléchit les rayons.

Une fois arrivés au bout du tube, nos rayons vont se réfléchir sur le miroir, et repartir dans l'autre sens, désexciter les atomes qui auront été ré-excités par le système de pompage optique, et arriver au second miroir, avec deux fois plus de photons qu'au premier. Ce rayon va rebondir, et la lumière va être amplifiée une fois encore. C'est pour cela que le laser amplifie la lumière.

Au bout d'un certain moment, il y aura tellement de photons dans le tube qu'il n'y aura plus émission stimulée, il existe une limite.

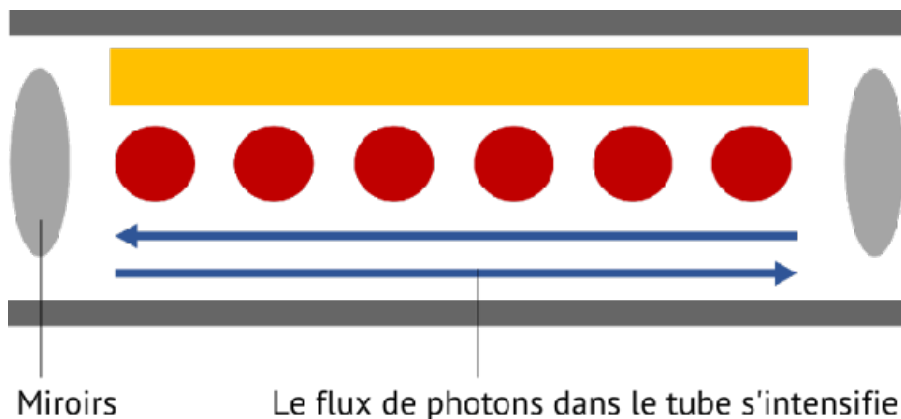


FIG. 5.14: Le flux de photons dans le tube s'intensifie à chaque fois qu'il est réfléchi par un des miroirs.

Pour éviter que la lumière créée ne reste indéfiniment dans le tube, on place à l'une des extrémités de celui-ci un miroir semi-réfléchissant, c'est-à-dire qu'il réfléchit une partie de la lumière et en laisse passer une autre (5 à 10 % en général).

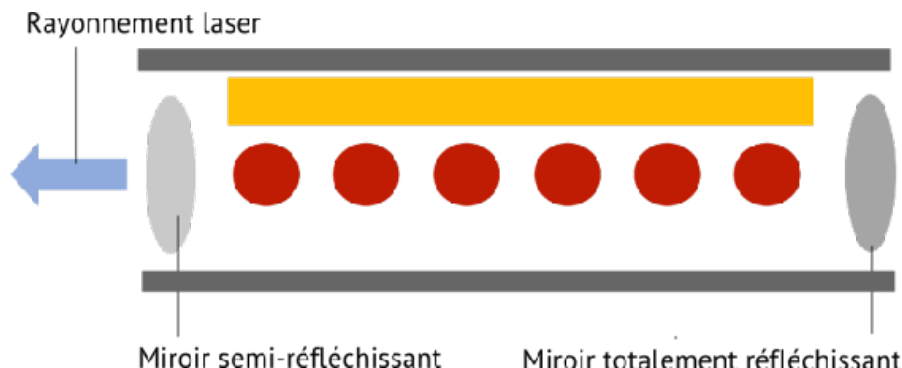


FIG. 5.15: Avec un miroir semi-réfléchissant, un rayonnement laser peut sortir du tube.

Une partie de la lumière peut alors sortir du tube, c'est un Rayonnement Amplifié de Lumière créée par Émission Stimulée. Un rayon LASER.

La lumière laser a de nombreux avantages par rapport à une source classique de lumière : la direction du faisceau est unique, ce qui permet de concentrer beaucoup d'énergie. Les rayons lumineux qui sortent du laser sont en phase, ce qui permet de limiter le problème des interférences lumineuses lorsque l'on utilise un laser dans un montage.

Ces caractéristiques ont donné aux lasers de nombreux usages, de la lecture de données (CD ou code-barres) à la découpe industrielle, en passant par la médecine.

« *Je ne me fie quasi jamais aux premières pensées qui me viennent.*

» René Descartes.

Ce qu'il faut bien comprendre

- Dans le modèle de Bohr, les électrons tournent autour du noyau de l'atome sur différents « rails », appelées des orbitales atomiques.
- Les électrons peuvent changer d'orbitales en absorbant ou en libérant de l'énergie. Le LASER, par exemple, utilise ce principe physique.
- Les 4 nombres quantiques (n , L , m , s) suffisent à décrire entièrement l'état d'un électron dans le modèle de Bohr.

L'électron n'a presque plus de secret pour vous, mais ne pensez pas avoir fait le tour des caractéristiques de l'atome.

À la fin du XIXe siècle, alors que Bohr n'avait pas encore proposé sa théorie du modèle atomique, les premières recherches sur la radioactivité avaient déjà commencées... pratiquement par accident.

Ce phénomène physique ouvre encore de nouvelles portes aux chercheurs. Découvrons les principes fondamentaux de la radioactivité et ses bénéfices dans la science et dans notre quotidien.

La radioactivité

Un autre phénomène physique qui trouve une place dans la vie de tous les jours est la radioactivité. Mais savez-vous ce qu'est la radioactivité, d'où elle provient et ce qu'implique exactement ce phénomène ? Sa découverte est relativement récente, et si les applications de la radioactivité sont diverses, ce qu'elle implique d'un point de vue purement théorique est bouleversant pour les physiciens de l'époque de sa découverte. C'est un Français qui, pour la première fois va déceler le phénomène, et vous avez peut-être déjà entendu son nom : Henri Becquerel.

Un nouveau rayonnement

Nous sommes en 1896, et pour le moment, Becquerel, se pose des questions sur la phosphorescence. Certains corps, préalablement placés sous un éclairage, émettent de la lumière une fois plongés dans l'obscurité. On ne sait pas grand-chose sur ce phénomène et Becquerel va effectuer différentes expériences pour le décrire au mieux. En particulier, il place en face de matériaux phosphorescents des plaques photographiques, qui se colorent lorsqu'un rayonnement (comme la lumière) les frappe.

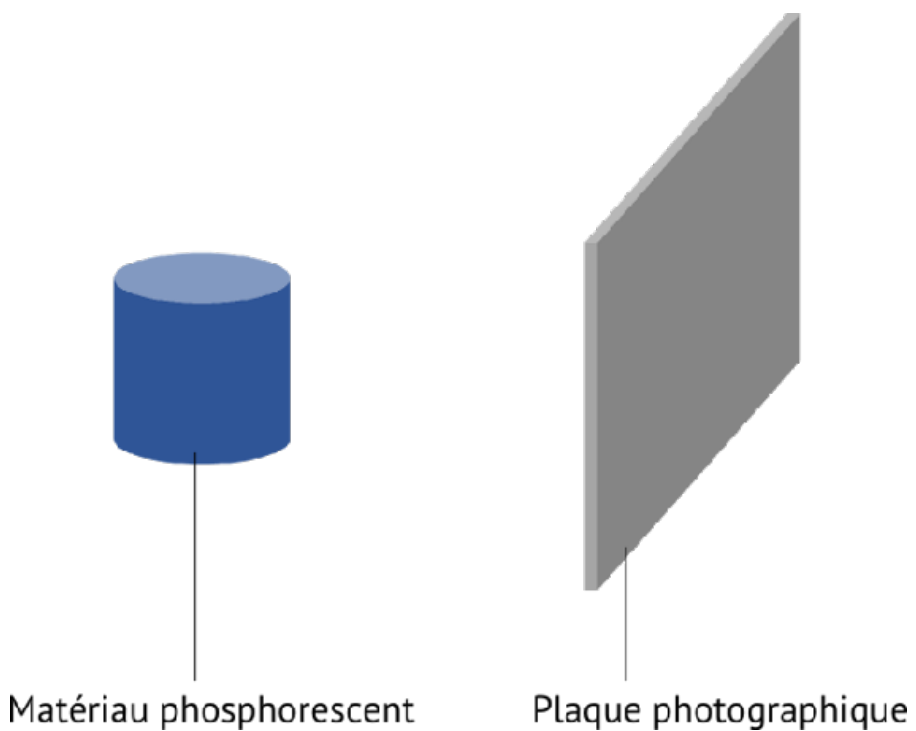


FIG. 6.1: le dispositif mis en place par Becquerel

Il tente l'expérience avec des sels d'uranium phosphorescents. Mais, ne pouvant éclairer les sels au préalable à cause des nuages, il est contraint de reporter l'expérience et range le tout dans un tiroir.

Et là, surprise, lorsqu'il ressort l'ensemble des jours plus tard, la plaque photographique est imprimée par un rayonnement, sans que les sels n'aient été exposés à la lumière. Les sels d'uranium émettent donc un rayonnement totalement indépendant du domaine de la phosphorescence, ils sont « radioactifs ».

Becquerel a ensuite découvert que ce nouveau rayonnement passait à travers un certain nombre de matériaux. Il ressemble d'ailleurs beaucoup aux rayons X, découverts l'année précédente par Röntgen. Ces derniers traversent la chair, mais pas les os, et laissent également des traces sur une plaque photographique. Des expériences menées par Pierre et Marie Curie montrèrent que ces nouvelles radiations sont bien plus complexes que les rayons X.

Très vite, il apparut que le « rayonnement » qui émane des matériaux radioactifs est composé d'au moins deux choses :

- Un rayonnement électromagnétique très intense, comme des rayons X (de très gros quanta d'énergie, plus de 1000 fois plus énergétiques qu'un quantum de lumière), nommé rayonnement γ (gamma).
- De très petites particules.

Ces rayonnements sont identiques quel que soit le matériau radioactif étudié. Seule la quantité de rayonnement émis varie en fonction de l'échantillon étudié : certains matériaux sont « plus radioactifs » que d'autres.

Pour mieux observer ces particules, Charles Winson inventa en 1912 un outil appelé la chambre à brouillard. C'est un petit cube rempli de vapeur d'alcool. Lorsqu'une particule chargée comme un électron passe à travers ces vapeurs, elle provoque la condensation d'une partie de l'alcool et laisse une trace dans le milieu. Lorsque l'on plaçait un matériau radioactif dans une chambre à brouillard, les traces se multipliaient. On en observait en multitude, des petites et épaisses, des longues et fines.

Le résultat ressemblait alors à ceci :

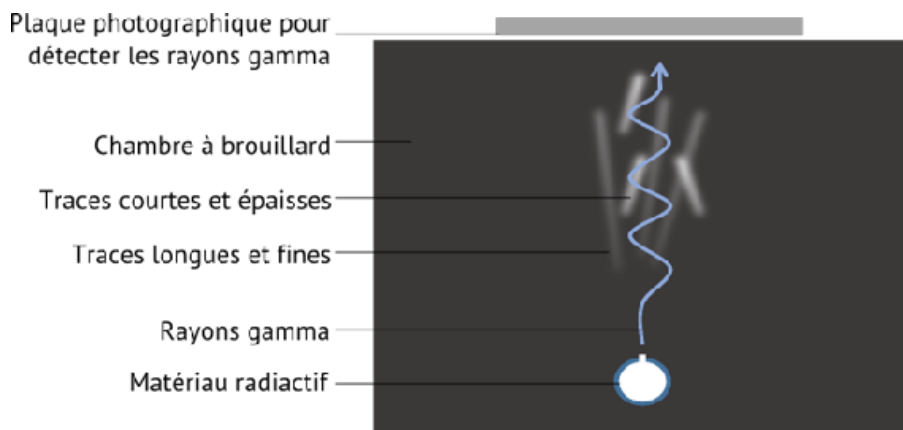


FIG. 6.2: schéma d'une chambre à brouillard

Grâce à cette expérience, il fut prouvé que le rayonnement radioactif peut être divisé en deux rayonnements particuliers et un rayonnement ondulatoire :

- Un rayonnement particulaire qui laisse de grosses traces, alpha (α) ;
- Un rayonnement particulaire qui laisse des traces fines, bêta (β) ;
- Un rayonnement électromagnétique, gamma (γ).

Voici à quoi ressemblaient les traces laissées par ces rayonnements :



FIG. 6.3: Rayonnement



FIG. 6.4: Rayonnement

Essayons d'en savoir un peu plus sur les particules α et β , leur charge par exemple. Pour cela, plaçons un aimant dans la chambre :

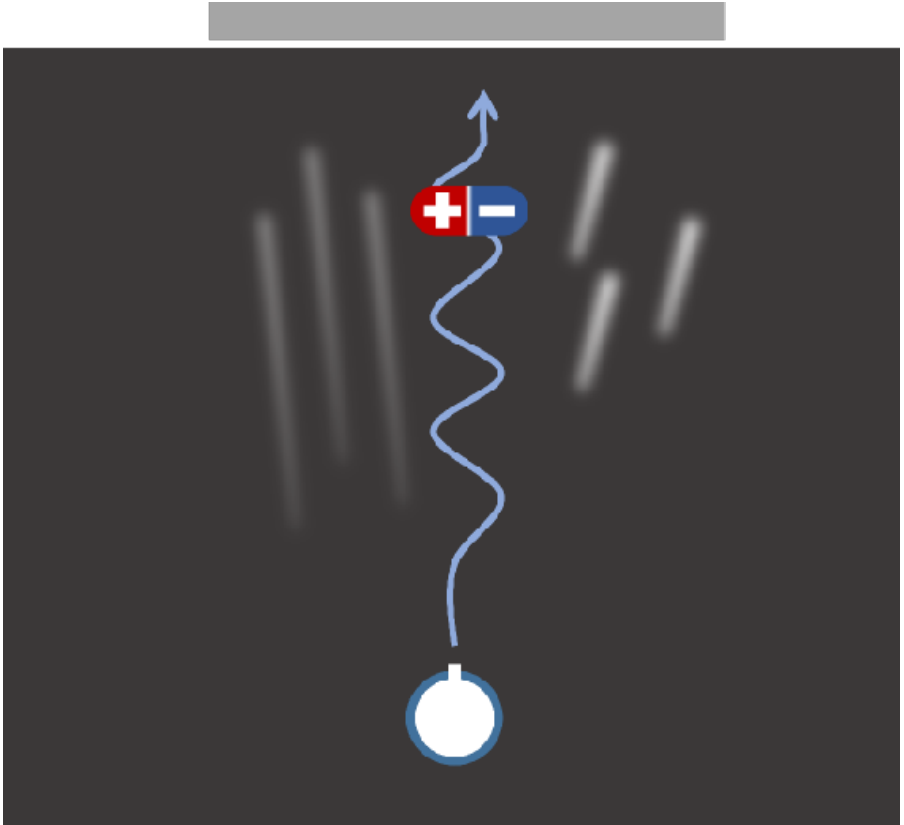


FIG. 6.5: Les rayonnements sont déviés par un aimant

Les particules alpha sont donc de charge positive et les bêta de charge négative. En étudiant la magnitude de la déviation, c'est-à-dire en regardant à quel point les particules étaient attirées par les aimants, on a pu déterminer le poids de chacune des particules, et quantifier leur charge. Avec ces informations, il est possible de déterminer la composition des particules observées. En l'occurrence, les particules alpha sont des noyaux d'hélium ou hélions. Les particules bêta sont en général des électrons (et parfois d'autres particules appelées positons,

qui ont une charge positive).

Petite anecdote : lors de la catastrophe nucléaire de Tchernobyl, les « liquidateurs », personnes qui avaient la charge de débayer les déchets radioactifs, reçurent une médaille qui représentait cette expérience, avec une goutte de sang à la place de l'aimant.

La recherche sur le sujet de la radioactivité est pourtant loin d'être terminée. Pierre et Marie Curie notamment vont apporter de nombreuses connaissances sur le sujet.

Les différents types de radioactivités

Au fur et à mesure du temps, on découvrit d'autres roches et éléments radioactifs. Par exemple, Pierre et Marie Curie traitèrent des tonnes de pechblende, une roche uranifère pour récupérer quelques milligrammes de radium, un élément environ 1000 fois plus radioactif que l'uranium.

Le radium est un élément chimique qui fait partie de la famille des alcalino-terreux, au même titre que le calcium et le magnésium. Tous les alcalino-terreux ont les mêmes propriétés chimiques (ce sont des métaux, qui forment des ions similaires, etc.). Pourtant, dans cette grande famille des alcalino-terreux, seul le radium est radioactif. Cette particularité serait-elle la clé pour la compréhension de l'origine de la radioactivité ?

Quelle est la principale différence entre le magnésium et le radium ? C'est la taille de ces atomes, leur nombre de protons et de neutrons composant leurs noyaux. Il y a 12 protons dans un noyau de magnésium, 88 dans un noyau de radium.

Plus il y a de protons, plus il y a d'électrons, plus ceux-ci occupent des orbitales éloignées du niveau fondamental. Les couches externes étant moins stables, et les noyaux volumineux également instables, les

atomes avec un numéro atomique élevé comme le radium sont très instables, et vont tenter de se stabiliser. Comment ? En effectuant diverses transformations, appelées désintégrations, comme Rutherford le découvrira et que nous allons détailler.

La Radioactivité β - (Bêta moins)

Certains atomes instables le sont à cause d'un excès de neutrons, et ils seraient plus stables s'ils changeaient ces neutrons excédentaires en protons. Nos atomes instables radioactifs vont donc effectuer cette transformation. Mais celle-ci n'est pas sans conséquences. En effet, la transformation d'un neutron en proton provoque une réorganisation au niveau du noyau. Celui-ci doit émettre de l'énergie, sous la forme d'un électron, qui va d'ailleurs laisser une trace dans la chambre à brouillard.

Pourtant, cette libération d'énergie pose problème. La théorie de conservation de l'énergie stipule que l'énergie totale de l'atome radioactif avant désintégration doit être égale à l'énergie de l'atome après désintégration ajoutée à celle des produits de la désintégration (c'est-à-dire l'énergie des particules α , β et des rayons γ).



FIG. 6.6: Conservation de l'énergie

Or, en expérimentant, on trouve systématiquement une énergie des produits inférieure à celle des réactifs. Deux solutions :

- Soit, comme le privilège Bohr, le principe de conservation de l'énergie ne s'applique pas. Après tout, le monde de l'infiniment petit ne nous a-t-il pas appris à remettre en cause la physique classique ?

○ Soit, il faut rajouter un produit.

Pour Pauli, rajouter un produit serait plus vraisemblable. Il nomme ce produit « neutrino », une particule neutre et très difficile à détecter. C'est cette intuition qui s'avéra bonne. Le neutrino fut découvert expérimentalement plus tard, et on renomma le neutrino de la désintégration β antineutrino électronique. Cette particule se note $\bar{\nu}_e$, avec ν pour le neutrino, $\bar{}$ pour l'anti et e pour « électronique ».

Dans environ 10 % des désintégrations, la réorganisation interne du noyau suite à l'incrémentation du numéro atomique provoque l'émission d'une autre particule, un photon très énergétique, le rayonnement gamma (γ), en plus de l'électron et de l'antineutrino électronique.

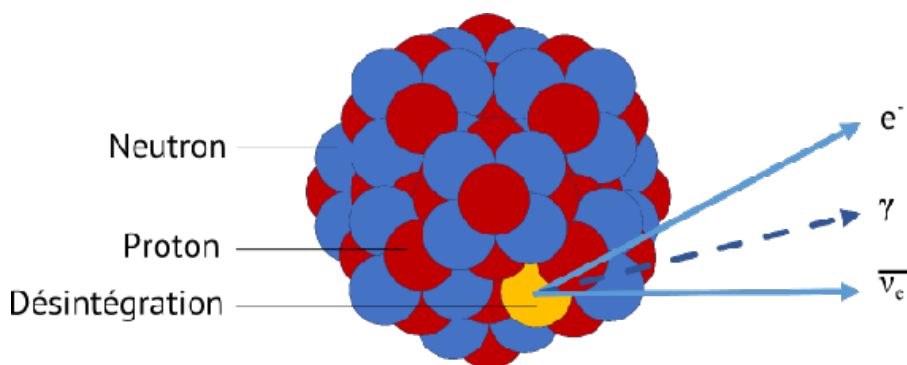


FIG. 6.7: Désintégration β (Bêta moins)

La Radioactivité β^+ (Bêta plus)

Dans le sens inverse, certains atomes sont instables à cause d'un excès de protons, et diminuer leur numéro atomique les stabiliserait un peu. Cette transformation va se faire, avec de nouvelles émissions de particules : un positon (parfois dit positron) noté e^+ , et un neutrino électronique noté ν_e . Le positon est une particule de même masse et spin que l'électron, mais avec une charge positive. Un autre rayon

gamma peut être éventuellement émis par le noyau.

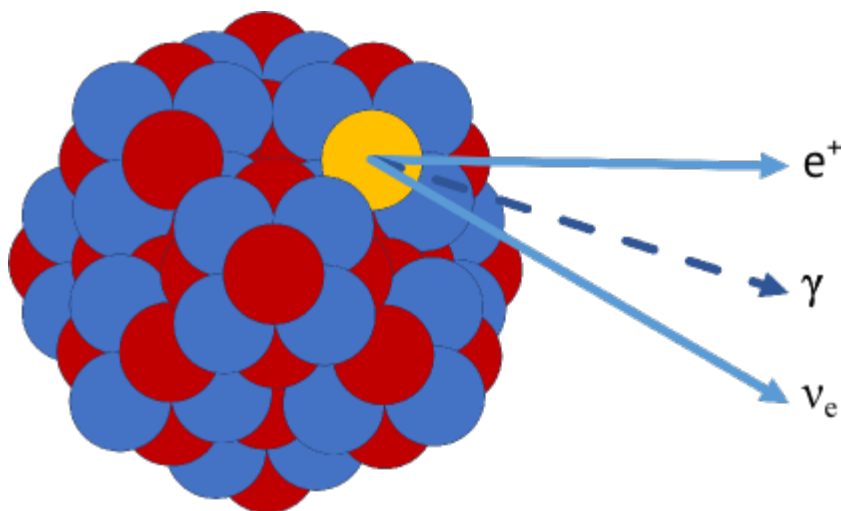


FIG. 6.8: Désintégration β^+ (Bêta plus)

La radioactivité α (Alpha)

Les très gros atomes, très instables, ont parfois besoin de se libérer à la fois de protons et de neutrons. Pour ce faire, le noyau instable peut émettre une particule alpha, ou hélion. C'est un noyau d'hélium, soit deux protons et deux neutrons. Un traditionnel rayon gamma peut éventuellement être détecté.

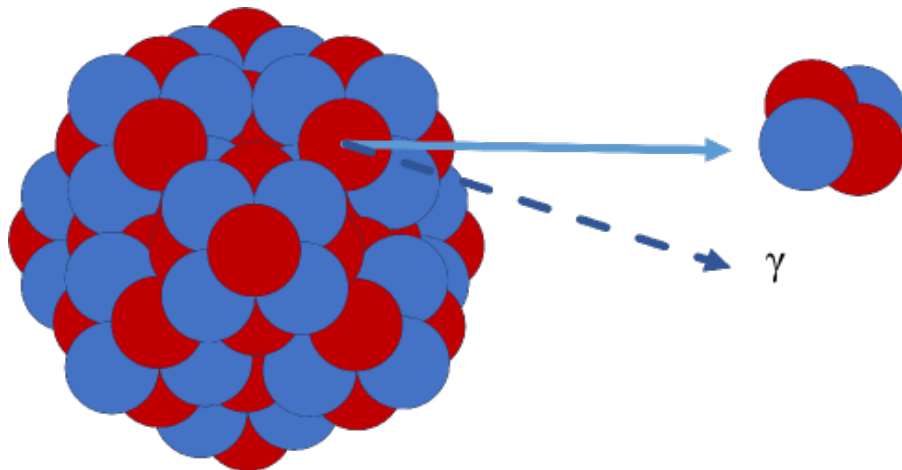
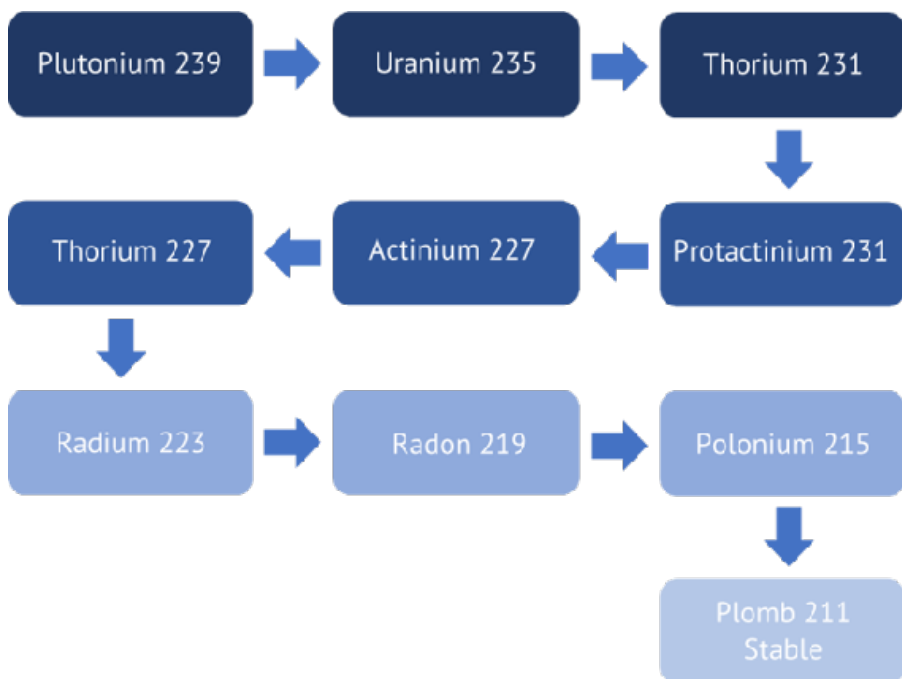


FIG. 6.9: Désintégration α (Alpha)

Désintégrations successives

Parfois, une seule désintégration ne suffit pas pour rendre stable un noyau atomique, c'est pourquoi la plupart des éléments radioactifs effectuent successivement une série de désintégrations radioactives jusqu'à la stabilité. On parle alors de chaîne radioactive.



Lorsque l'on a découvert la radioactivité, les firmes pharmaceutiques, entre autres, incorporèrent de l'uranium et d'autres éléments radioactifs dans leurs médicaments et cosmétiques, leur associant des effets miracles sur la beauté ou la santé.

Comment ? Vous ne désirez pas vous faire appliquer un masque rajeunissant au thorium ? Alors c'est sans doute parce que vous avez déjà entendu parler des effets négatifs de la radioactivité excessive. En effet, dans chacune de vos cellules, vous possédez de l'ADN qui contient l'information génétique. Lorsqu'un rayon gamma ou bêta frappe ces brins d'ADN, ceux-ci perdent de l'information, se cassent ou sont modifiés, et ces modifications ont une faible probabilité de produire des tumeurs. Elles ont également une part de responsabilité dans les processus d'évolution.

Alors vous vous demandez peut-être comment arrêter ces méchants rayons. Pour les rayonnements alpha, ce ne sera pas trop dur : ce sont des grosses billes de matière et vous couvrir d'une feuille de papier suffira à les arrêter. Les électrons des rayons bêta vous donneront plus de fil à retordre : ils sont plus petits, mais sont chargés, et une feuille d'aluminium pourra les arrêter sans problème. Les neutrinos et antineutrinos eux traversent chaque seconde la terre de part en part sans avoir d'effet, ils sont plutôt inoffensifs ! Par contre, les rayons gamma sont de gros quanta et il est difficile d'arrêter toute cette énergie. 15 cm de plomb pourront arrêter plus de 99% des rayons, mais jamais 100%.

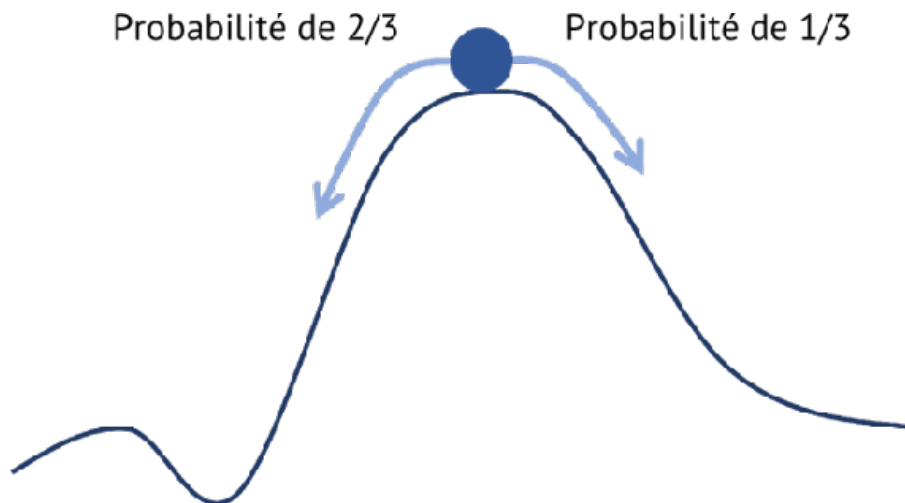


FIG. 6.12: situation aléatoire impensable en physique classique

La physique classique aurait prédit que la balle irait dans l'une ou l'autre direction dans 100 % des cas. Dans l'infiniment petit, les choses se passent différemment.

Prenons maintenant une grande quantité d'atomes instables (n). Une quantité proche de l'infini. À chaque seconde, chaque atome a une certaine chance de se désintégrer, ce qui fait que le nombre d'atomes instables va diminuer jusqu'à ce qu'il ne reste plus que la moitié. Nous allons nommer ce temps qu'a mis la moitié des atomes à se stabiliser « demi-vie » (t). À la fin d'une demi-vie, il ne nous reste donc que la moitié du nombre d'atomes initial. La probabilité qu'un atome se désintègre restant la même, il faudra attendre la fin d'une autre demi-vie t pour qu'il ne reste plus qu'un quart des atomes. Pour un nombre t de demi-vies écoulées, il reste $n / 2^t$ atomes instables, avec n le nombre d'atomes au début de l'expérience.

Concrètement, voici les observations que l'on peut faire :

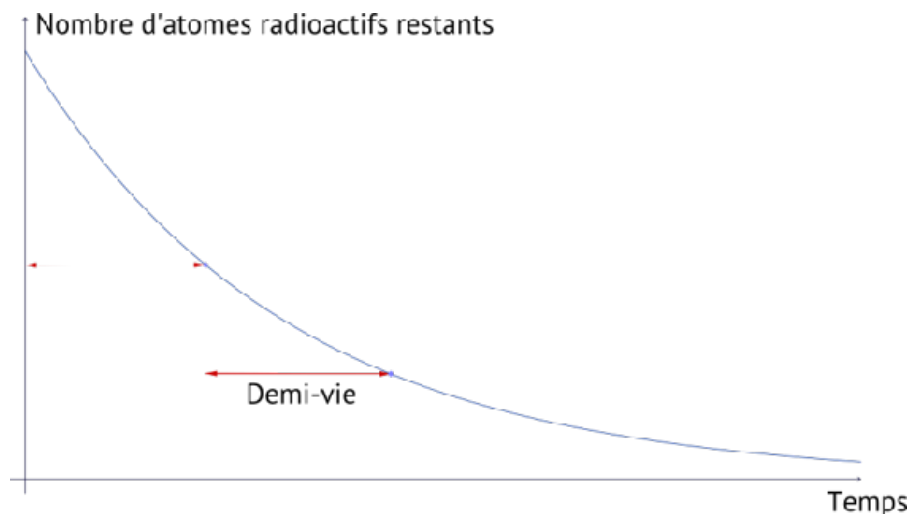


FIG. 6.13: *Décroissance exponentielle d'une population d'atomes radioactifs*

Cette décroissance rapide du nombre d'atomes est appelée décroissance exponentielle.

Si la découverte de la radioactivité est si importante, c'est parce que c'est l'un des premiers phénomènes physiques vraiment aléatoires et imprévisibles. L'aléatoire et l'indéterminisme seront des composantes essentielles de la physique quantique qui s'avérera de plus en plus étrange.

« *Dieu ne joue pas aux dés.* » Albert Einstein.

Ce qu'il faut bien comprendre

- La radioactivité est un phénomène naturel.
- Un atome est radioactif parce qu'il est instable. En se stabilisant, il se désintègre et émet des particules radioactives.
- La désintégration radioactive est l'un des premiers phénomènes réellement aléatoire découvert par l'Homme. Il est impossible de savoir précisément à quel moment précis un atome va se désintégrer. On ne peut alors utiliser que des lois probabilistes.

Cette première partie du livre vous a permis de découvrir ou de redécouvrir le comportement de la matière à l'échelle quantique.

Passons maintenant aux grands principes du monde quantique et à toutes ses bizarreries contre-intuitives qui font tant parler.

Les grands principes du monde quantique

Retour aux fentes d'Young

Comme nous l'avons vu précédemment avec les recherches de Louis de Broglie, il est possible d'associer une onde à chaque particule en mouvement.

Des phénomènes de diffraction d'électrons ont prouvé la pertinence de cette théorie. Lors de cette découverte, des scientifiques ont immédiatement eu l'idée de réitérer l'expérience de Young, qui avait permis de démontrer (à tort) la nature purement ondulatoire de la lumière.

L'expérience d'Young réitérée

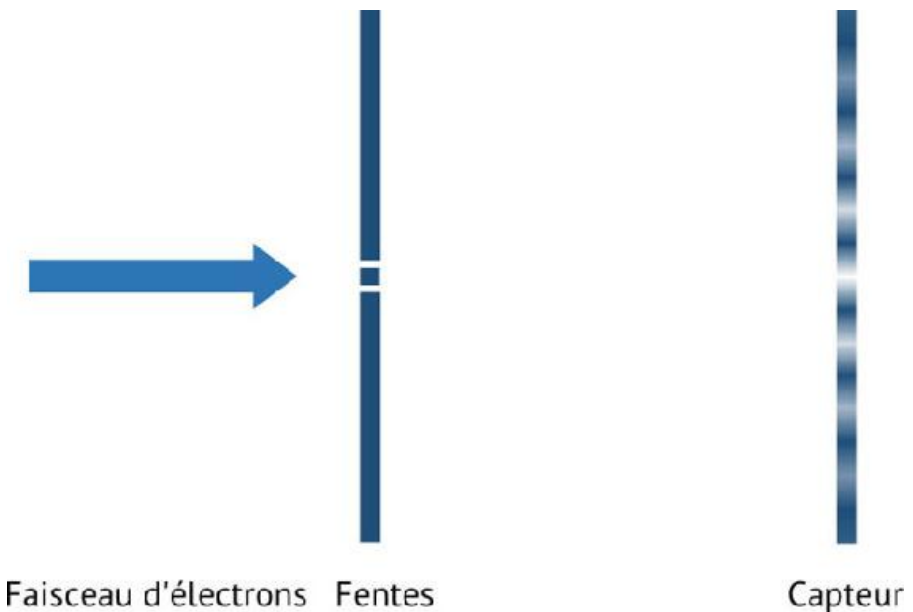
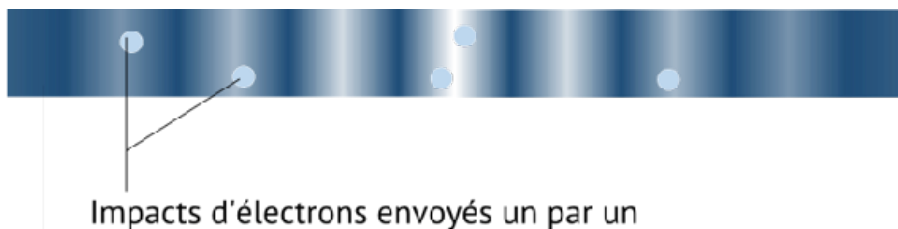


FIG. 1.1: rappel de l'expérience de Young. on projette un faisceau d'électrons dans des fentes très fines face à un capteur.

Néanmoins, cette réitération n'apporta rien de vraiment nouveau : elle était juste une preuve supplémentaire de la dualité onde-corpuscule

qui existe au niveau microscopique. Elle devient plus intéressante lorsqu'en 1961, Claus Jönsson tente l'expérience avec un canon à électron capable d'envoyer non pas un faisceau d'électrons en direction des deux fentes, mais un électron à la fois. L'expérience se déroule comme si l'on envoyait des petites billes vers le montage.

Lorsque les électrons passent la fente, leur nature ondulatoire provoque un phénomène d'interférences : l'électron interfère avec lui-même. Néanmoins, lorsque cette onde touche un capteur (un écran par exemple) situé après les fentes, cette nature ondulatoire disparaît : les électrons reprennent une nature corpusculaire et vont provoquer l'apparition d'une tâche sur l'écran à un endroit bien précis. Comme l'onde associée à l'électron a été diffractée et a subi des interférences, ces tâches peuvent se former à des endroits variés de l'écran, pas forcément en face des deux fentes, et certainement pas où les interférences ont été destructives.



Interférences observées avec un faisceau d'électrons constant

FIG. 1.2: *Expérience de Jönsson avec cinq électrons envoyés*

Un fait intéressant est que si l'on envoie un très grand nombre d'électrons vers l'écran, un par un, une figure d'interférences va se former petit à petit.

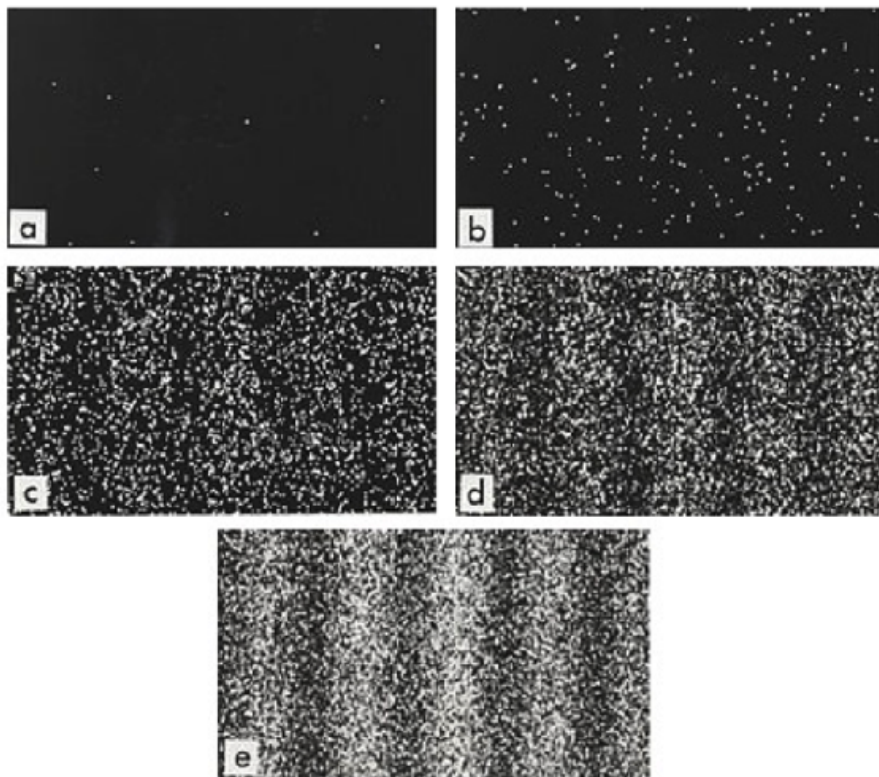


FIG. 1.3: les différentes étapes de l'expérience

La description probabiliste des phénomènes quantiques

Ces résultats sont maintenus quel que soit l'écart qui sépare deux émissions d'électrons. Même si nous envoyons un électron par semaine, une figure d'interférences sera observable après quelques années. Comment expliquer l'apparition progressive d'un tel motif ?

Pour résoudre ce problème, il faut se rappeler que la physique est indéterministe dans l'infiniment petit, et certains phénomènes obéissent à des lois de probabilité (le temps de désintégration d'un atome radioactif par exemple).

L'électron ne se manifestera pas sur l'écran avec des probabilités égales : celle-ci est plus élevée au niveau des zones d'interférences

constructives. Au bout d'un très grand nombre de détections d'électron, la concentration de tâches reflète la probabilité que l'électron touche le capteur dans une zone donnée.

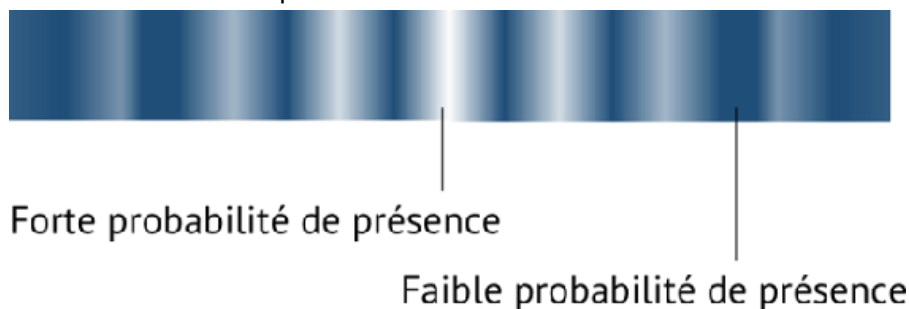


FIG. 1.4: Une interprétation probabiliste des résultats de l'expérience

Une expérience célèbre permet d'illustrer l'effet des lois de probabilité dans une expérience : la planche de Galton. Dans cette expérience, on fait tomber des billes dans une grille de clous. À chaque fois qu'une bille arrive sur un clou, elle a une chance sur deux (une probabilité de 0,5) d'aller à droite du clou, et une chance sur deux d'aller à sa gauche. On récupère les billes à la sortie de la grille à diverses positions. Il se trouve que lorsque le nombre de billes mises en jeu est assez élevé, le nombre de billes récupérées à chaque sortie de la grille reflète la probabilité d'une telle issue : on observe une distribution gaussienne (une courbe en cloche).

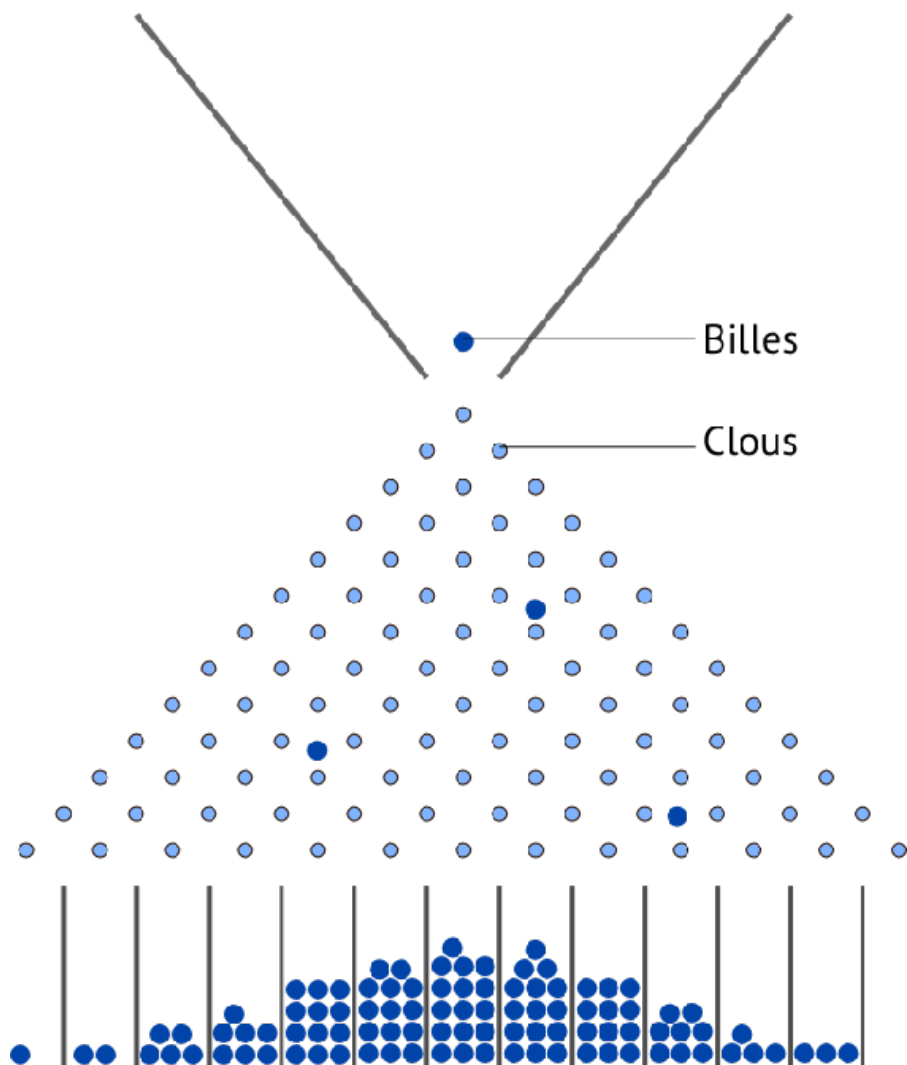


FIG. 1.5: *Planche de Galton*

Ici, un phénomène similaire se produit : à l'issue de l'expérience, les positions des impacts d'électrons reflètent la probabilité qu'ils soient détectés à un certain endroit. Ce n'est plus une courbe en cloche que l'on observe mais une figure d'interférences.

L'expérience de Young est un des exemples les plus frappants de la nature probabiliste des phénomènes quantiques. Ceux-ci sont en effet

indéterministes, on ne peut affirmer qu'un phénomène va se produire qu'avec une certaine probabilité.

Ainsi, la position d'un électron autour d'un noyau d'hydrogène ne peut plus être décrit en termes d'orbites, mais ne correspond qu'à un ensemble de probabilités : on ne peut pas déterminer la trajectoire précise d'un tel électron, mais seulement les différents lieux auquel il pourra se trouver, avec la probabilité de le trouver en ce lieu si l'on fait une mesure (en « photographiant » la position de l'électron par exemple).

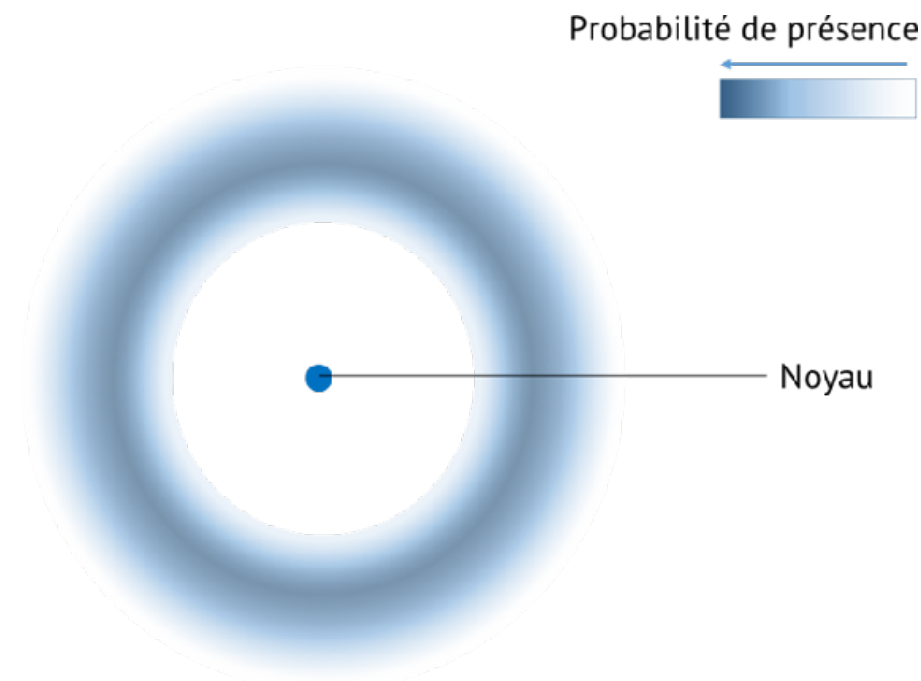


FIG. 1.6: Probabilités de présence d'un électron autour du noyau dans un atome d'Hydrogène

À notre échelle, ces phénomènes indéterministes ne sont pas visibles, le nombre de particules considérées étant très grand : les lois de la physique classique sont une approximation de ces jeux probabilistes. Par exemple, si l'issue d'une expérience en physique quantique est

une courbe en cloche, au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de particules mises en jeu, cette courbe va se resserrer jusqu'à devenir un pic : seul ce pic est tenu en compte par la physique classique.

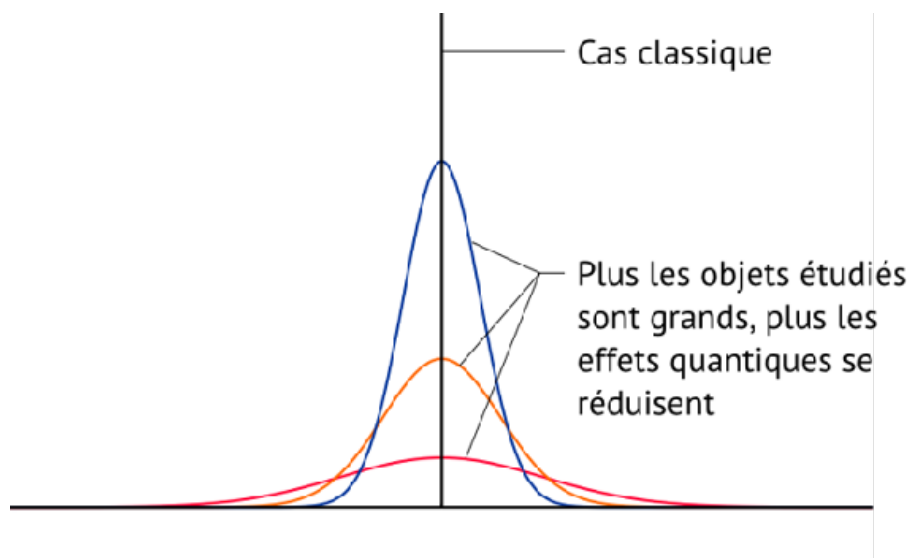


FIG. 1.7: La physique classique est une approximation de la physique quantique.

La réduction du paquet d'onde

Dans cette nouvelle expérience des fentes de Young réside tout l'aspect déroutant de la dualité onde-particule. L'électron a interféré avec lui-même, dans sa nature ondulatoire : il est passé par les deux fentes à la fois sous forme d'onde. Mais n'est-ce pas étrange pour une particule d'être à deux endroits en même temps (dans la fente de droite et celle de gauche) ?

Et si l'on veut savoir par quelle fente est passée l'électron ? Il suffirait d'ajouter un instrument de mesure ! Lorsque l'on place un quelconque instrument de mesure autour des fentes, on peut voir l'électron passer

par l'une des deux fentes, jamais les deux. D'ailleurs, les résultats obtenus reflètent la probabilité que l'électron passe par une fente ou une autre (classiquement une chance sur deux).

Il semblerait que tout s'arrange : la physique classique est en partie sauvée, une particule ne peut pas se situer à deux endroits distincts en même temps. Néanmoins quelque chose de plus étrange se déroule : on ne retrouve pas des franges d'interférences, mais les traces des fentes, comme si les électrons étaient des particules !

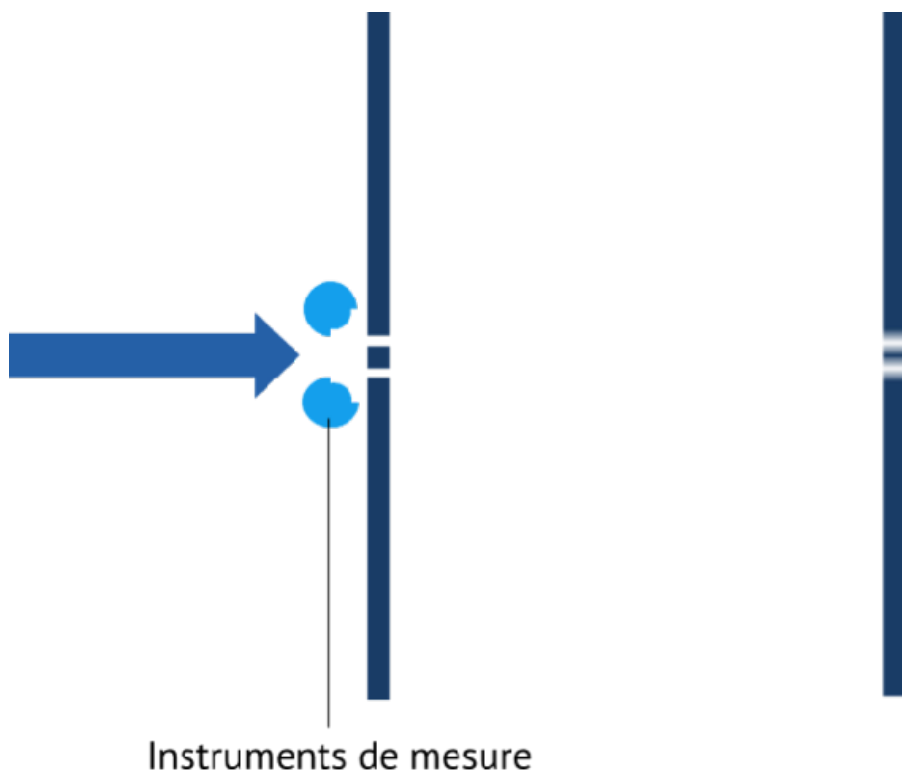


FIG. 1.8: *Expérience de Jönsson avec la présence d'instruments de mesure*

Un seul changement dans cette expérience par rapport à la précédente : l'appareil de mesure. Ce fait est l'un des plus troublants de la physique quantique : lorsque l'on fait des mesures sur un objet « quantique », l'état de l'objet est réduit à la valeur mesurée ou observée. L'électron, lors de sa mesure, a quitté une dualité onde-

particule quantique, pour s'assimiler à une particule « classique » : une simple particule localisée à un endroit précis, sans l'intervention de probabilités. La mesure a « forcé » la particule à passer par une seule fente et à adopter des caractéristiques précises : vitesse, direction, etc. L'électron a maintenant exactement les mêmes caractéristiques (fixes, non probabilistes) que celles qui ont été mesurées.

De même, lorsque l'on « photographie » à un instant précis un atome d'hydrogène, on y voit son unique électron en un endroit précis, et non plus avec des probabilités de présence. Grâce à la mesure, son état indéterminé s'est transformé en un état simple et déterminé, avec une position unique. Ce phénomène de réduction de l'état d'un objet à celui mesuré s'appelle la « réduction du paquet d'onde » ou « l'effondrement quantique ».

Ainsi, la physique quantique continue à s'engouffrer dans l'indéterminisme avec l'utilisation de plus en plus systématique de probabilités. Cette vision probabiliste fut surtout développée par Bohr dans le cadre du courant qu'il a mené de « L'école de Copenhague ».

« Si l'électron nous a servi à comprendre beaucoup de choses, nous n'avons jamais bien compris l'électron lui-même ». Louis de Broglie.

Ce qu'il faut bien comprendre

- La physique mathématise le monde pour mieux le comprendre. La physique quantique n'échappe pas à cette règle, sauf que les outils mathématiques qu'elle utilise sont bien différents de ceux de la physique classique.
- La physique quantique utilise notamment le concept de probabilité. En effet, certains événements dans l'infiniment petit sont incertains (comme la position d'un électron à un instant donné).
- Le fait d'effectuer une mesure sur un objet quantique fait disparaître toutes ses caractéristiques quantiques. On parle de réduction du paquet d'onde.

Parlons mathématique justement. Comment les maths arrivent-elles à formaliser et décrire les phénomènes quantiques ? C'est ce que nous allons voir dans le chapitre suivant.

Mathématisation des phénomènes quantiques

La physique quantique se base avant tout sur des mathématiques poussées, où la théorie précède les vérifications expérimentales : c'est suite à des résultats mathématiques apparemment invraisemblables que cette branche de la physique est née ; ses plus grandes lois proviennent de résultats mathématiques sans lien initial avec la réalité physique des choses (prenons par exemple la relation de Louis de Broglie). Avec son modèle de l'atome, Bohr fut l'un des premiers à décrire l'atome comme un objet mathématique : quatre nombres, les nombres quantiques, suffisent à décrire l'état d'un électron dans un atome.

L'état quantique

Cette « mathématisation » de la physique quantique s'est rapidement imposée, et le rêve de nombreux physiciens fut de décrire d'une façon purement mathématique un objet quantique, avec toutes les implications indéterministes qu'une telle description sous-entend.

Plusieurs optiques furent adoptées pour résoudre ce problème : certains, comme le physicien allemand Werner Heisenberg, vont décrire les objets quantiques avec des tableaux de valeurs, des matrices. D'autres, comme Erwin Schrödinger, un physicien autrichien, décidèrent d'utiliser des fonctions.

À propos des mathématiques

Toutes ces représentations mathématiques rentrent dans un concept beaucoup plus vaste, celui de « vecteur ». On ne parle pas ici d'un vecteur « flèche », avec deux ou trois coordonnées, mais d'un objet mathématique bien plus général qui regroupe fonctions, matrices, nombres, etc. Nous ne nous intéresserons pas au fonctionnement de ces objets mathématiques complexes, mais

il s'avéra assez rapidement que chaque objet quantique peut être représenté par un « vecteur ».

Cette représentation mathématique d'un objet quantique se note avec des crochets appelés « kets » : $|\dots\rangle$ (on parle de notation de Dirac). Un symbole commun pour représenter un système quantique est la lettre grecque psi (ψ). L'objet mathématique qui représente l'objet quantique ψ est ainsi noté $|\psi\rangle$. Connaissant ce $|\psi\rangle$, on peut prédire le résultat de certaines expériences, les probabilités que le système évolue de telle ou telle façon, etc.

Cette mathématisation du monde quantique se fait d'une façon complètement contre-intuitive. Dans la pratique, le physicien représente l'objet quantique d'une façon totalement abstraite (avec des nombres complexes, des espaces à dimension infinie...). La magie s'opère lorsque le scientifique se demande comment ce système va se comporter dans telle ou telle situation : de sa description totalement abstraite ne reste à la fin de son calcul qu'un nombre simple, réel, entre 0 et 1 : la probabilité de tel ou tel événement.

Ce qui est étonnant, c'est que cette mathématique très complexe et abstraite n'est pas une approximation de la réalité physique, mais la réalité elle-même. Dans l'infiniment petit, on ne peut pas décrire le monde uniquement avec des objets mathématiques intuitifs (comme une vitesse, une position...). Seuls des outils mathématiques complexes et contre-intuitifs peuvent représenter la réalité quantique.

Observables et opérateurs

Un objet quantique est ainsi quelque chose de très abstrait : on ne peut pas décrire un système quantique autrement qu'avec des équations très complexes. Il est très difficile de donner une réalité physique à un système quantique : en effet, dès que l'on observe un tel objet, il cesse d'être quantique. Néanmoins, cette observation n'est

pas vaine, on en tire des mesures : vitesse (ou quantité de mouvement), position, etc.

Les informations issues de la mesure sont appelées « observables ». Grâce aux lois de la physique quantique, on peut prédire les probabilités d'apparition de telle ou telle valeur lorsque l'on mesure une observable.

Comme pour les états quantiques, les observables sont représentées par des objets mathématiques : les opérateurs. Les opérateurs sont notés avec un accent circonflexe et ne font qu'effectuer une opération sur un autre objet (en général sur le vecteur représentant l'objet quantique étudié, $|\psi\rangle$ par exemple). Ainsi, l'observable « position sur

l'axe x » se note $\hat{X}$ et ne fait que multiplier le vecteur affecté par une variable, x : $\hat{X}|\psi\rangle = x|\psi\rangle$; l'observable associé à la quantité de mouvement $\hat{P}$ effectue une opération de dérivation sur le vecteur affecté... Les solutions de ces équations sont les « valeurs propres » de l'opérateur et correspondent aux différents résultats que l'on peut obtenir lors de la mesure de l'observable. Ainsi, lorsque l'on mesure la position sur l'axe x de l'objet étudié, les valeurs que l'appareil de mesure peut donner sont des x .

Opérateur associé à l'observable étudiée (ici la position)

Les x solutions de l'équation sont les différentes valeurs que peuvent prendre l'observable lors de la mesure

$$\hat{X} |\psi\rangle = x |\psi\rangle$$

Objet mathématique représentant l'objet quantique étudié

FIG. 2.1: Un aperçu du formalisme mathématique en physique quantique.

Il n'y a pas de contrainte ici sur x : l'objet peut se trouver n'importe où sur l'axe. Néanmoins, il arrive que ces valeurs propres soient limitées en nombre : lors d'une mesure on ne peut pas trouver n'importe quel résultat. Ces résultats de mesure sont en effet quantifiés.

Le principe d'incertitude d'Heisenberg

En mathématisant la physique quantique et en s'intéressant à ces concepts d'observables, les scientifiques prirent conscience d'un autre problème de la physique quantique : la précision que l'on peut espérer avoir lors de l'étude d'un système quantique est limitée.

Lorsque l'on effectue une mesure quelconque en physique, il est toujours important de considérer une certaine marge d'erreur. Ainsi, vous ne mesurez votre taille qu'au cm près, avec une marge d'erreur de ± 1 cm. En général, cette erreur est liée à une imprécision du matériel de mesure : avec une règle classique, vous ne pourrez pas mesurer le diamètre d'un atome. Avec des instruments de plus en plus précis, la marge d'erreur liée à la mesure décroît, jusqu'à devenir proche de zéro. Néanmoins, des calculs théoriques démontrèrent que cette réduction de la marge d'erreur est limitée, ou du moins a un coût.

Pour certaines observables, dites incompatibles, l'incertitude associée à ces deux observables ne peut pas être nulle en même temps. Par exemple, en physique quantique, nous ne pouvons connaître en même temps et avec une précision absolue la position et la vitesse (plus globalement la quantité de mouvement) d'une particule. De plus, plus l'incertitude sur une observable est faible, plus grande sera l'autre.

Ainsi si l'on connaît précisément la vitesse d'une particule, il y aura une grande incertitude sur sa position. Si la position d'une particule est connue avec une précision infinie, on ne peut absolument rien affirmer sur sa vitesse : elle peut être de n'importe quelle valeur entre zéro et la vitesse de la lumière.

Pour deux observables X et Y, les incertitudes qui y sont associées ΔX et ΔY sont telles que :

$$\Delta X \times \Delta Y > 0$$

Pour la quantité de mouvement P et la position X, on a même :

$$\Delta P \times \Delta X > \frac{\hbar}{2}$$

C'est le principe d'incertitude, ou théorème d'indétermination de Heisenberg. Celui-ci recevra pour ses travaux le prix Nobel de physique en 1932.

Faisons une analogie : un électron ou une particule de petite taille est comparable à une balle de fusil. Vous voulez connaître à la fois la vitesse de la balle et ses caractéristiques (comparable à n'importe quelle observable). Si vous arrêtez la balle avec un mur, vous pourrez connaître son type, mais impossible d'en estimer la vitesse. Au contraire, si vous laissez la balle filer, vous pouvez estimer sa vitesse mais difficilement connaître ses caractéristiques.

Ce qui est troublant est le fait que cette incertitude ne soit pas liée à des erreurs de mesure : elle est fondamentale. Quoi qu'on fasse, on ne pourra pas connaître avec précision et en même temps deux informations incompatibles sur le système. C'est ainsi avec le principe d'incertitude de Heisenberg que l'on peut expliquer le phénomène de diffraction de la lumière par une fente : en faisant passer un faisceau de lumière par une fente très étroite, la position des photons est connue avec une grande précision : au moment où la fente est traversée, le photon est forcément dans l'espace très réduit formé par l'interstice. À cause du principe d'incertitude d'Heisenberg, il en résulte automatiquement une incertitude sur d'autres observables, comme la quantité de mouvement et la direction que prend le photon. Cette incertitude se répercute comme un étalement des directions de propagation de la lumière : la diffraction.

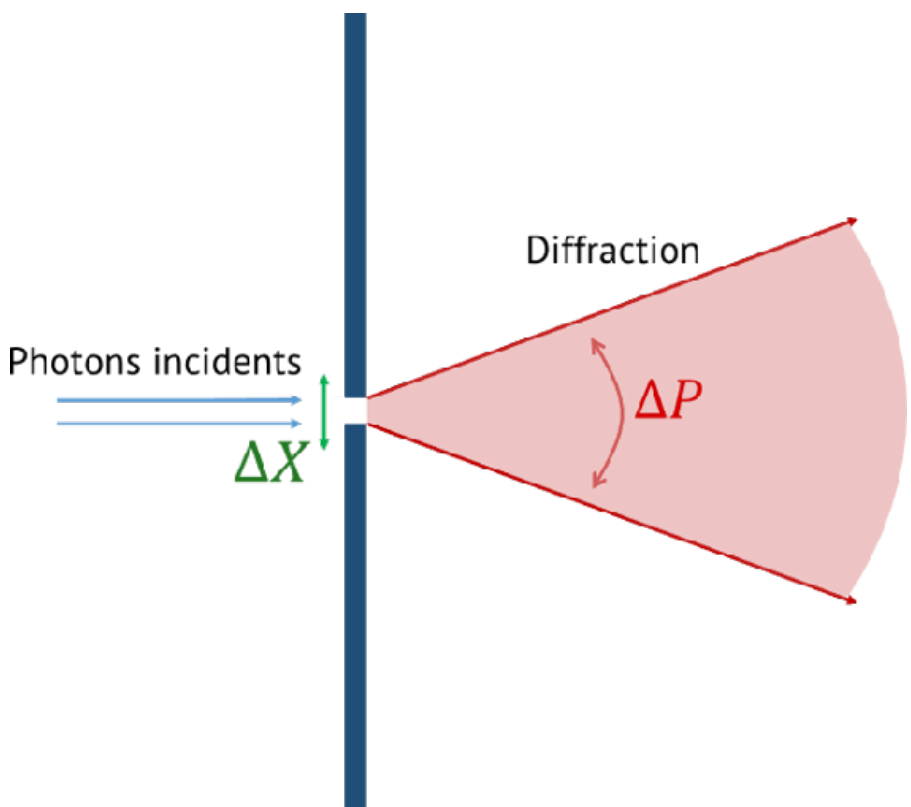
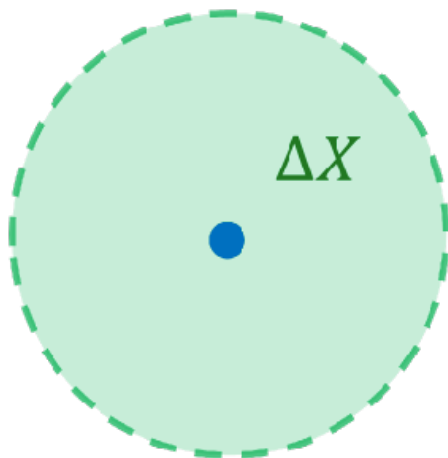
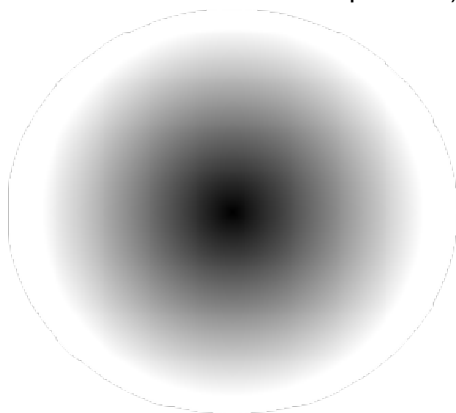


FIG. 2.2: le phénomène de diffraction expliqué par le principe d'incertitude d'Heisenberg

En physique classique il n'y a pas d'incertitude fondamentale sur la position ou la quantité de mouvement d'un système. Par exemple, grâce aux lois de la mécanique de Newton, on peut déterminer à chaque instant la position d'un objet et sa vitesse (donc sa quantité de mouvement). Cette nouvelle forme d'indéterminisme dérouta encore une fois les physiciens. Une fois de plus, des conclusions physiques insolites étaient tirées de raisonnements purement mathématiques. Pour vérifier que sa loi avait une réalité physique, Heisenberg tenta de la briser. Il imagina une expérience qui mesurerait de la façon la plus exacte possible la position et la quantité de mouvement d'une particule. Pourrait-on, en étant vraiment délicat, connaître en même temps la position et la quantité de mouvement d'une particule ?

Comment fait-on pour mesurer la position d'une particule ? Le plus

simple est d'utiliser un microscope (optique par exemple) : on envoie des photons sur la particule étudiée, et en observant la déviation des photons par la particule, on peut déterminer sa position. De plus, plus les longueurs d'onde utilisées sont faibles, plus l'image obtenue sera claire. Si l'on observe une bille avec des micro-ondes (dont la longueur d'onde est de l'ordre du cm), l'image obtenue sera très floue (il y aura une grande incertitude sur la position). Au contraire, si l'on utilise des rayons X, de fréquence bien plus élevée, les contours de l'objet observé seront très nets (il y aura une faible incertitude sur la position).



Avec une petite
longueur d'onde

Avec une grande
longueur d'onde

FIG. 2.3: à gauche, une particule observée grâce à des photons de

longueur d'onde faible. à droite, la même particule observée avec des photons de longueur d'onde plus élevée.

Pour mesurer une vitesse et donc une quantité de mouvement, il suffit de mesurer deux positions successives de l'objet étudié.

Prenons le microscope le plus délicat que l'on puisse imaginer : il utilise un seul photon pour détecter la particule. Plus la longueur d'onde de ce photon est faible, plus l'incertitude associée à la position la sera. Toutefois, lorsqu'un photon touche une particule, il lui transmet une partie de sa quantité de mouvement. Dès que l'on mesure la position d'une particule, une incertitude sur sa quantité de mouvement est induite : on ne sait pas à quel point le photon a modifié la vitesse et la direction de déplacement de la particule. De plus, d'après la relation de De Broglie, plus la longueur d'onde d'un photon est faible, plus sa quantité de mouvement est élevée, et plus l'incertitude induite sur la quantité de mouvement est importante.

Ainsi, dans cette expérience, plus l'incertitude sur la position est faible (plus la longueur d'onde utilisée l'est), plus l'incertitude sur la quantité de mouvement est importante. Au contraire, plus l'incertitude sur la position est importante, moins l'est l'incertitude sur la quantité de mouvement.

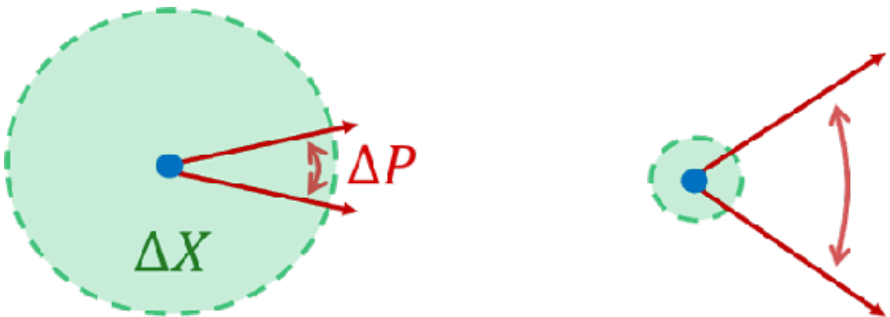


FIG. 2.4: *À gauche, il y a une grande incertitude sur la position de la particule étudiée, mais une petite incertitude sur sa quantité de mouvement. à droite, c'est l'inverse.*

Lorsqu'un observateur fait la mesure de deux positions et en déduit

une vitesse et une quantité de mouvement, celui-ci doit prendre en compte deux incertitudes : celle liée à la position, due à la longueur d'onde utilisée, et celle induite sur la quantité de mouvement lors des mesures. Il ne pourra jamais y avoir deux incertitudes nulles.



FIG. 2.5: *Mesures successives de position et incertitudes induites sur la quantité de mouvement*

La physique quantique s'est donc rapidement affirmée comme une branche de la physique complètement différente de celles que nous connaissions déjà. Avec le théorème d'indétermination d'Heisenberg, la mécanique quantique devient totalement indéterministe, et prend un aspect beaucoup plus mathématique. Il ne faudrait pas comprendre que les mathématiques permettent une approximation des phénomènes de l'infiniment petit. Les outils mathématiques de la mécanique quantique (probabilités, incertitudes) reflètent parfaitement la réalité, le monde quantique est mathématique. Contrairement à la physique classique où des phrases permettent de décrire des phénomènes, la physique quantique nécessite des mathématiques poussées, avec des outils abstraits comme des probabilités.

« Nous devons nous rappeler que ce que nous observons n'est pas la Nature elle-même, mais la Nature soumise à notre méthode de questionnement ». Werner Heisenberg.

Ce qu'il faut bien comprendre

- L'un des enjeux des chercheurs en physique quantique consiste à mathématiser le plus pertinemment possible les phénomènes quantiques. Cela veut dire trouver des équations mathématiques qui représentent parfaitement la réalité.
- En 1927, Heisenberg énonça son célèbre principe d'incertitude : il est impossible de connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule donnée.
- Lorsqu'on étudie une particule, soit on peut connaître précisément sa position contre une grande incertitude sur sa vitesse, soit on peut connaître précisément sa vitesse contre une grande incertitude sur sa position.

Les bases mathématiques posées dans le chapitre précédent vous aideront à bien comprendre le concept aussi célèbre qu'incompris de superposition quantique, magistralement illustré par l'expérience du chat de Schrödinger.

La superposition quantique

Origine du probabilisme quantique : la superposition d'états quantiques

Pour décrire un système quantique complexe mathématiquement, il suffit de faire la somme des systèmes quantiques simples qui représentent l'issue d'une mesure, avec des coefficients qui élevés au carré reflètent la probabilité de telle ou telle issue. Ces coefficients s'appellent « amplitudes de probabilité ». On a :

$$|\psi\rangle = \alpha_1|\psi_1\rangle + \alpha_2|\psi_2\rangle + \alpha_3|\psi_3\rangle + \alpha_4|\psi_4\rangle + \dots$$

Où les α sont les amplitudes de probabilité, telles que la probabilité $p(|\psi_n\rangle)$ de voir le système s'effondrer dans l'état $|\psi_n\rangle$ lors d'une mesure est de $p(|\psi_n\rangle) = (\alpha_n)^2$.

Pour aller plus loin :

En général, ces amplitudes sont des nombres complexes. Pour obtenir une probabilité, il faut alors élever le module de cette amplitude au carré : $p(|\psi_n\rangle) = |\alpha_n|^2$.

Un exemple éclaircira cette explication. Considérons une pièce de monnaie comme un système quantique. C'est faux en pratique, mais cela nous servira d'illustration. Lors de la mesure de l'observable « orientation de la pièce », les résultats que l'on peut obtenir sont : « pile » et « face », et la probabilité de chacune de ces observations est de 0,5. On peut représenter mathématiquement le système quantique de la pièce de la façon suivante :

$$|\text{pièce}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{pile}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{face}\rangle$$

En effet :

$$p(|pile\rangle) = p(|face\rangle) = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = 0,5.$$

Ainsi, un système quantique complexe est la somme de différents états, superposés. Avant la mesure de l'état de la pièce, celle-ci est à la fois « pile » et « face », cet état dual s'effondre lors de la mesure pour n'en former qu'un.

Prenons un autre exemple : un billet de loterie a une certaine probabilité d'être gagnant, mettons 1 sur 1 000 000, et une probabilité beaucoup plus élevée de ne pas l'être (dans ce cas 999 999 sur 1 000 000). Avant le tirage du numéro gagnant, le billet n'est ni gagnant ni perdant, il a une certaine probabilité d'être gagnant et une certaine probabilité d'être perdant, c'est tout. Par contre, après le tirage, il est soit gagnant, soit perdant, il n'y a plus d'incertitude. Néanmoins, dans la grande majorité des cas, il s'avérera que le billet était perdant.

Avant le tirage, le billet est dans la superposition des deux états gagnant et perdant : le billet n'est ni gagnant ni perdant, il a juste une probabilité d'être gagnant et une probabilité de ne pas l'être. Après le tirage, l'état du billet « s'effondre » : il est soit gagnant, soit perdant.

Dans un véritable système quantique, le même phénomène se produit : ainsi, avant toute mesure, un électron autour d'un noyau ne se situe pas à un endroit précis : sa position n'obéit qu'à des probabilités, et on ne peut pas vraiment dire où il est. Par contre, après la mesure, l'électron est fixé en un point, là aussi, l'incertitude disparaît. Il existe toutefois des zones dans lesquelles l'électron a plus de chance de se trouver lorsque l'on effectue une mesure.

Paradoxe du chat de Schrödinger et interprétation Evrettiste de la superposition quantique

Cette superposition d'états est un autre aspect de la physique quantique qui dérouta les physiciens : pour accentuer le paradoxe lié à cette idée, le physicien autrichien Erwin Schrödinger imagina une expérience de pensée très connue, celle du chat qui porte son nom. Schrödinger y met en scène une boîte opaque contenant un atome radioactif, un chat et une fiole de poison mortel qui se brise si l'atome se désintègre.

L'atome a, à chaque instant, une certaine probabilité de se désintégrer, et de tuer le pauvre chat. Si on ne regarde pas dans la boîte, on ne peut pas savoir si l'atome s'est désintégré, ou si le chat est mort. On ne peut que s'appuyer sur des probabilités. Au bout d'une demi-vie, le chat a une chance sur deux d'être vivant, une chance sur deux d'être mort.

Pour Schrödinger, le chat est à la fois mort et vivant. Cette conclusion totalement irréaliste démontre pour lui l'incohérence de certains aspects de la physique quantique : dans l'infiniment petit, un électron peut se situer à deux endroits en même temps, et même en une infinité d'endroits en même temps.

Différentes théories furent imaginées pour résoudre ce paradoxe ainsi que celui de la mesure quantique. L'une des plus farfelues est celle du physicien Hugh Everett, appelée notamment « théorie des mondes multiples ». D'après cette théorie, lors d'une mesure, la nature crée autant d'univers parallèles que de résultats possibles. Suivant des lois de probabilités, l'observateur va pouvoir voir l'un des univers, ignorant tout ce qui se passe dans les autres. Ainsi, lorsque l'on ouvre la boîte pour voir si le chat est mort ou vivant, deux univers parallèles sont créés : l'un dans lequel le chat est en vie, un autre dans lequel il ne l'est plus. La probabilité pour que l'observateur bascule dans l'un ou l'autre des univers est égale à 0,5.

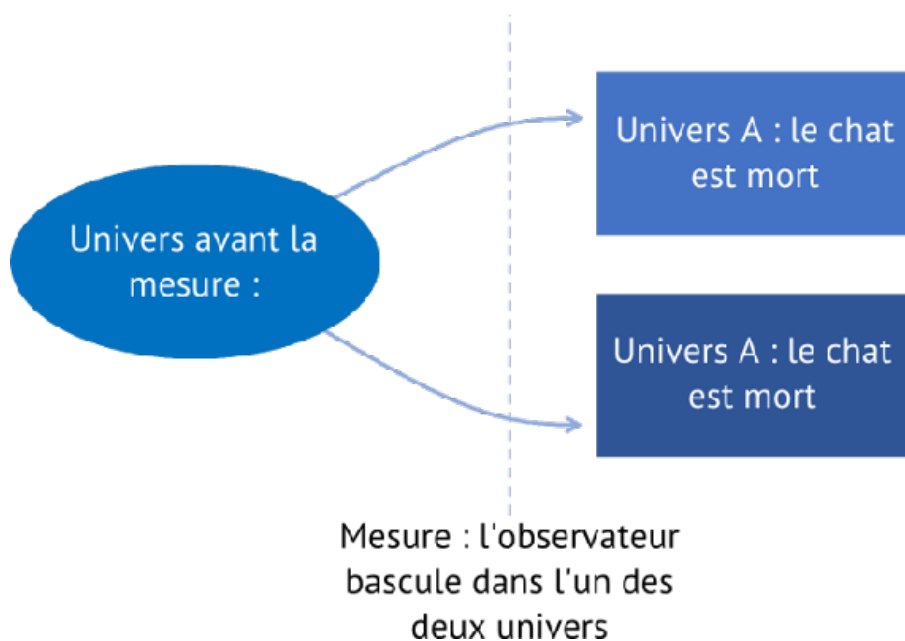


FIG. 3.1: *Théorie d'Everett*

Ceci n'est qu'une théorie parmi une multitude d'autres, mais elle vous donne une idée des théories qui sont aujourd'hui étudiées dans le monde de la physique quantique, se basant sur des modèles mathématiques très complexes.

« Une théorie mathématiquement belle a plus de chance d'être correcte qu'une théorie inélégante, même si cette dernière décrit correctement les résultats expérimentaux ». Paul Dirac.

Ce qu'il faut bien comprendre

- En physique quantique, un objet peut être dans un état et son contraire simultanément. Mathématiquement, cela se décrit parfaitement bien (voir l'exemple de la pièce de monnaie qui a 50 % de chance de tomber sur pile, 50 % sur face).
- Cette superposition d'états ne doit pas être imaginée intuitivement. C'est ce que montre l'expérience de Schrödinger : en pratique, un chat ne peut pas être mort ET vivant. Imaginer naïvement un objet dans son état et son contraire manque de pertinence.
- Deux courants de pensée, entre autres, proposent d'interpréter ce principe de superposition : la théorie d'Everett et l'interprétation de Copenhague.

Un objet quantique peut se trouver dans plusieurs états simultanément. Cela ne facilite pas les raisonnements. Heureusement, les mathématiciens et les physiciens ont inventé des outils très pratiques pour nous aider à y voir plus clair : les fonctions d'onde. Voyons de quoi il s'agit et comment en tirer profit.

Décrire les systèmes quantiques

Les fonctions d'onde

Décrire un système quantique, c'est décrire tous les états dans lequel le système peut s'effondrer après une mesure, et les probabilités d'un tel effondrement. On peut alors représenter le système comme une somme, et tracer un graphe des différentes issues possibles de l'expérience. Si l'on considère une pièce de monnaie comme un système quantique, voici ce que l'on peut obtenir.

En le représentant de manière mathématique :

$$|pièce\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|pile\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|face\rangle$$

En le représentant de manière graphique :

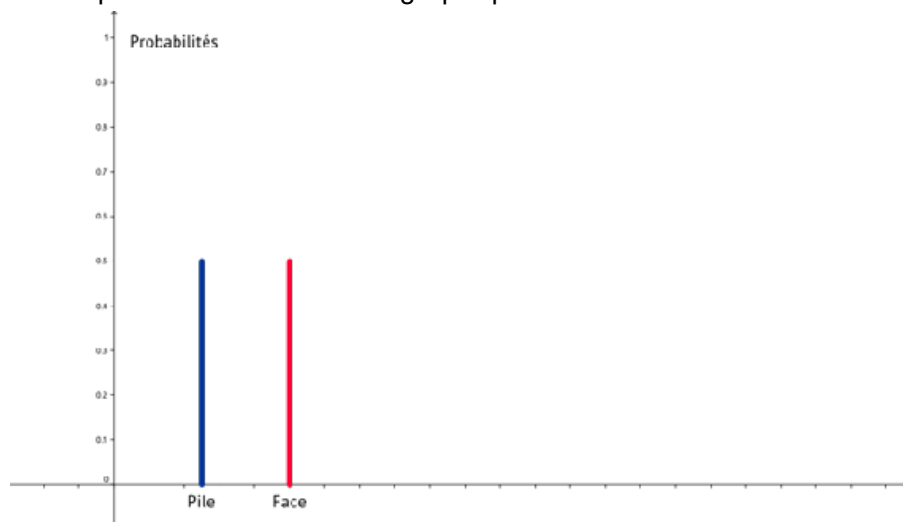


FIG. 4.1: représentation graphique du système quantique « pièce de monnaie »

Mais ici, le nombre de résultats possibles à l'issue d'une mesure était

très faible, limités à deux. Que se passe-t-il lorsque le nombre de résultats est infini, en mesurant la position d'une particule par exemple ? L'état considéré devient une somme infinie d'autres états « coefficientés » de différentes amplitudes de probabilité. Mathématiquement, cela peut se représenter sous la forme d'une fonction.

Le système :

$$|\psi\rangle = \alpha_1|\psi_1\rangle + \alpha_2|\psi_2\rangle + \alpha_3|\psi_3\rangle + \alpha_4|\psi_4\rangle + \dots$$

Peut se représenter graphiquement de la façon suivante :

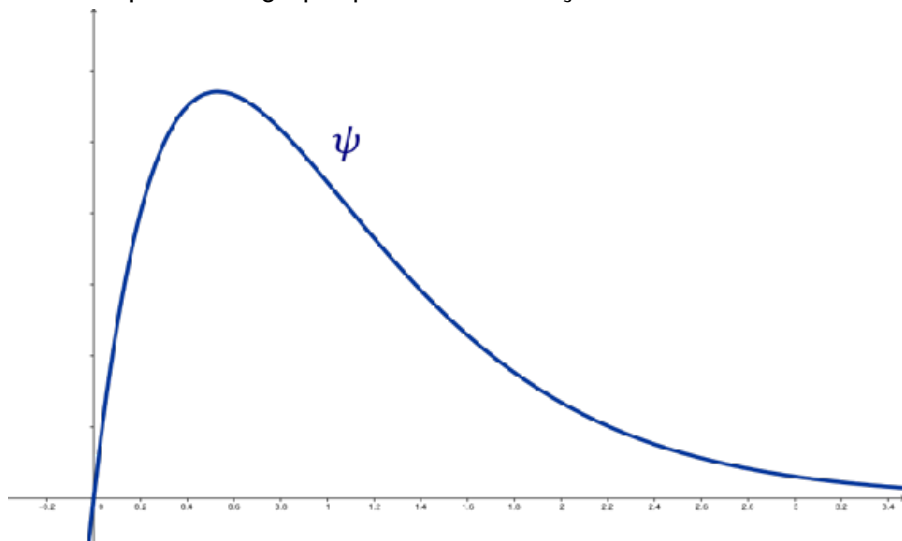


FIG. 4.2: représentation graphique d'un système quantique plus compliqué, sous la forme d'une fonction

Cette fonction s'appelle la fonction d'onde, et se note souvent ψ : elle regroupe des informations sur les amplitudes de probabilité de chaque état quantique. Si l'on cherche la probabilité de trouver une particule dans un espace donné, on établira une fonction d'onde en fonction de la position $\psi(x, y, z)$. Si l'on cherche la probabilité que notre particule ait telle ou telle quantité de mouvement, on établira une fonction d'onde en fonction de la quantité de mouvement $\psi(p)$.

La fonction d'onde élevée au carré nous renseigne sur la probabilité

de telle ou telle mesure. Cette fonction de la forme ψ^2 est appelée fonction de densité.

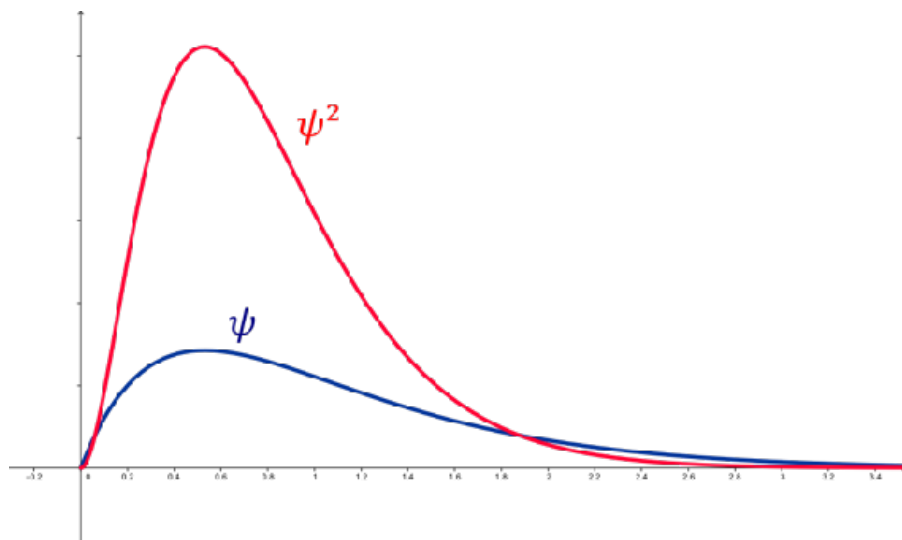


FIG. 4.3: Fonction d'onde et fonction d'onde élevée au carré (fonction de densité)

La probabilité de trouver un état très précis lors de la mesure est en général si faible qu'on la considère nulle. Par exemple, la probabilité d'obtenir 1,87538372895406 Å (1 Å = 0,1 nanomètre) lorsque l'on mesure la distance qui sépare l'électron du noyau dans un atome d'hydrogène est négligeable. Néanmoins, avec une fonction du type ψ^2 , on peut faire des approximations, calculer la probabilité d'obtenir un résultat dans un intervalle donné, de trouver la particule dans un espace bien délimité. Par exemple, la probabilité d'obtenir une mesure entre 0,5 et 0,6 Å est de 10 %.

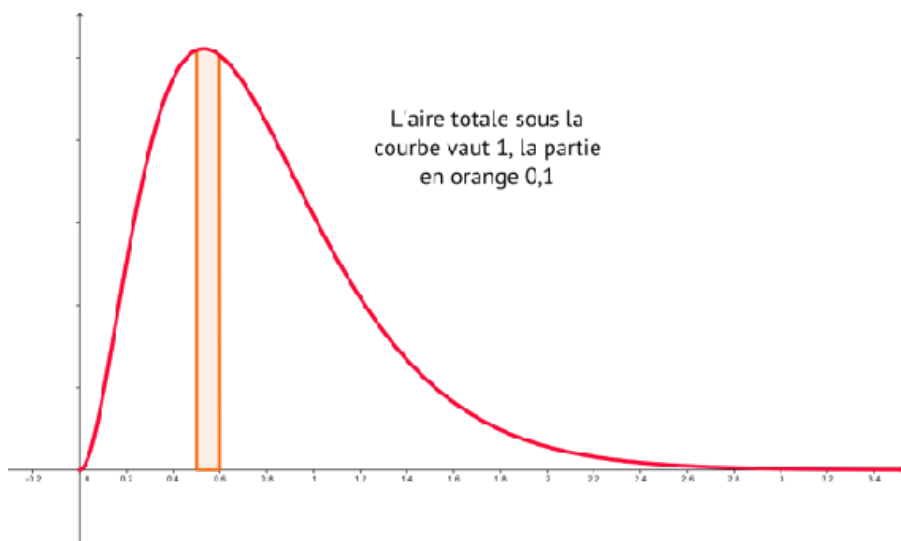


FIG. 4.4: *Interprétation du carré de la fonction d'onde*

L'aire totale sous la courbe est de 1, et en mesurant l'aire sous la courbe entre deux abscisses, on peut trouver la probabilité d'obtenir un résultat entre ces deux valeurs : on fait une intégration. Ainsi, plus la courbe est haute en une valeur, plus la probabilité de trouver une mesure autour de cette valeur est élevée. Pour notre électron de l'atome d'hydrogène, la fonction de densité atteint un maximum en $0,529 \text{ \AA}$: c'est autour de cette valeur que l'on a le plus de chances de détecter l'électron. Cette valeur est également le rayon de la première orbite dans le modèle atomique de Bohr.

Ce qui est pratique, c'est que pour un même système, des formules lient ces fonctions d'onde. En connaissant la fonction d'onde $\psi(x, y, z)$, on peut trouver $\psi(p)$, et les fonctions d'onde du système en fonction de tout paramètre intéressant.

Cet outil de la fonction d'onde sera beaucoup développé par des physiciens comme Schrödinger, et l'utilisation de fonctions pour décrire un système quantique se révélera bien plus pratique que celle des matrices.

Dans cet exemple, la fonction d'onde considérée ne prenait en compte

qu'un seul paramètre : la distance séparant le noyau de l'électron. En réalité, les fonctions d'onde étudiées en physique quantique sont des fonctions complexes à plusieurs paramètres, impossibles à représenter sur un graphe en deux dimensions.

L'équation de Schrödinger

Les fonctions d'onde nous donnent les probabilités d'obtenir tel ou tel résultat lors d'une mesure, mais à un instant donné seulement. Par exemple, la fonction d'onde d'un électron se déplaçant en ligne droite nous donne ses probabilités de présence en un instant donné. Pour connaître la trajectoire de la particule (l'ensemble des points parmi lesquels l'électron a le plus de chances de se trouver, au cours du temps), il faut savoir comment la fonction d'onde évolue en fonction du temps.

Ce problème de l'évolution temporelle de la fonction d'onde fut résolu par Schrödinger avec les équations qui portent son nom. Pour votre information, voici l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{d\psi}{dt} = \hat{H}\psi$$

Où $\hat{H}$ est l'opérateur Hamiltonien qui renseigne sur l'énergie dont dispose le système.

Inutile de savoir la résoudre, sachez juste que c'est cette équation qui permet de décrire l'évolution d'un système quantique en fonction du temps, et est l'une des plus importantes en mécanique quantique.

« Après mon exposé, il n'y a eu ni opposition ni questions difficiles ; mais je dois avouer que c'est précisément cela qui m'a le plus choqué. Car si, de prime abord, on n'est pas horrifié par la théorie quantique, on ne l'a certainement pas comprise. Probablement mon exposé était-il si mauvais que personne n'a compris de quoi il était question » Niels

Bohr.

Ce qu'il faut bien comprendre

- Les fonctions d'onde sont des outils mathématiques très pratiques pour représenter les issues possibles d'une expérience quantique.
- On peut notamment utiliser une fonction d'onde pour représenter la probabilité de présence d'un électron autour du noyau d'un atome.

Hormis la superposition quantique, il existe bien d'autres phénomènes propres à l'infiniment petit. L'intrication quantique et l'effet tunnel font partie des comportements quantiques les plus intéressants à découvrir.

Les phénomènes quantiques

L'intrication quantique

Nous l'avons vu, les scientifiques furent contraints d'abandonner le déterminisme en physique quantique. Néanmoins, on retrouve le déterminisme lors de certains événements dans l'infiniment petit. Loin de rassurer, ces restes de physique classique ajoutent une couche de mystère à la mécanique quantique.

Prenons un exemple d'expérience où les issues sont en partie déterministes : deux électrons sont créés ensemble et partent dans des directions opposées. Ils ont chacun une probabilité de 0.5 d'avoir un *spin up* et une probabilité de 0.5 d'avoir un *spin down* lors d'une observation.

Rappel sur le spin :

Le *spin* d'un électron est l'une de ses propriétés quantiques. Il est difficile de se représenter un « spin up » ou un « spin down ».

Certains comparent le *spin* de l'électron à un minuscule aimant attaché à l'électron qui s'oriente vers le haut (up) ou vers le bas (down), et qui procure à l'électron des propriétés magnétiques bien particulières.

Néanmoins comme aucune mesure n'a été effectuée, nos deux électrons sont dans une superposition d'états ; ils ont à la fois un spin up et un spin down.

Lorsque l'on mesure le spin d'un des électrons, la superposition s'effondre, il aura soit un spin up, soit un spin down, sans ambiguïté. Il se trouve que quel que soit le spin que l'on mesure sur le premier

électron, le spin que l'on mesurera sur le second sera opposé (la somme des spins devant être nulle). Tout se passe comme si le premier électron avait « dit » au second comment se comporter, mais cette communication se fait de façon instantanée : on parle alors de téléportation quantique. Attention, ce n'est pas de la matière qui est transportée mais de l'information.

Le problème qui se pose est que, d'après la théorie de la relativité, aucune information ne peut être transmise instantanément, ou du moins pas à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Il y a une fois de plus un problème : cette conservation du déterminisme commun en physique classique en viole l'une des lois fondatrices. Comment résoudre le problème ?

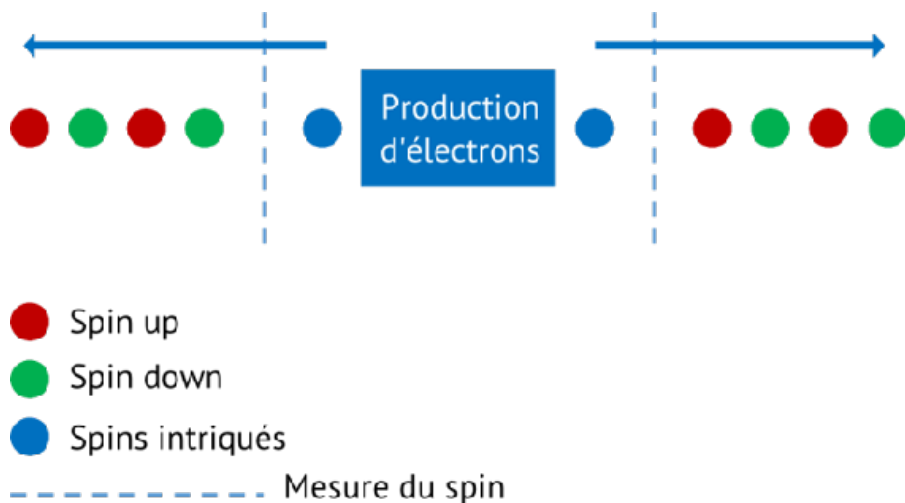


FIG. 5.1: l'intrication quantique : des électrons créés ensemble restent intriqués quel que soit leur éloignement.

L'astuce consiste à considérer les deux électrons non pas comme des systèmes indépendants mais comme un système unique. On dit que les deux électrons sont intriqués. Le fait qu'ils aient été créés en même temps a créé un lien entre eux qui ne disparaît pas même si des kilomètres les séparent. Avec cette considération, la barrière de la vitesse de la lumière n'est pas franchie : de l'information n'est pas échangée entre les deux électrons, dans la mesure où ils n'ont jamais

été véritablement séparés : ils sont toujours intriqués, on ne peut les étudier séparément.

Songez à quel point cette situation est paradoxale. En comparaison avec le monde macroscopique, c'est comme si les résultats d'un lancer de deux pièces étaient toujours « un pile un face » tant que ces pièces sont lancées en même temps...

L'effet tunnel

En physique classique, peut-être avez-vous déjà entendu parler de l'énergie potentielle. Tous les objets peuvent accumuler de l'énergie sous différentes formes. Une pile accumule de l'énergie sous forme chimique ; une braise ardente en contient sous forme thermique, un photon sous forme rayonnante. Un objet en mouvement comme une voiture dispose d'une énergie de mouvement dite « énergie cinétique ».

Une balle en haut d'une colline accumule-t-elle de l'énergie ? La réponse est oui, et le type d'énergie dont la pierre dispose est de l'énergie potentielle (dite « de pesanteur »). Cette énergie potentielle est égale à l'énergie cinétique dont pourrait disposer la pierre en roulant jusqu'en bas. Un piano qui tombe d'un cinquième étage dispose au début de sa chute d'une énergie potentielle et d'une vitesse nulle. À la fin de sa chute, le piano a perdu cette énergie potentielle mais dispose d'une vitesse et donc d'une énergie cinétique. En effet, l'énergie cinétique d'un objet en mouvement est proportionnelle au carré de sa vitesse v :

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Revenons à notre balle en haut d'une colline. La physique classique nous apprend que si l'on fait tomber un objet d'une hauteur h , il aura à la fin de sa chute une énergie cinétique, mais cette énergie cinétique ne pourra pas faire remonter l'objet à une hauteur supérieure à h .

Notre balle roulera en bas de la colline, accumulant de l'énergie cinétique qu'elle perdra en remontant. Une chose est sûre : la balle ne remontera pas plus haut que le point duquel elle est partie et ne franchira pas le pic. Le pic agit comme une barrière, une « barrière de potentiel ». On ne peut pas la franchir à moins que... les premiers mots de cette explication n'étaient-ils pas « En physique classique... » ?

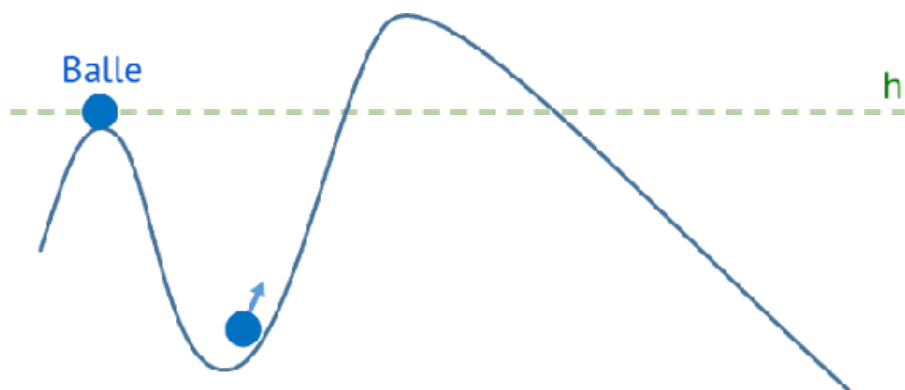


FIG. 5.2: barrière de potentiel en physique classique : la balle ne pourra pas remonter la colline

En effet, en physique quantique, les choses se passent légèrement différemment. Reprenons l'exemple de la balle: derrière notre pic, il y a une pente sur laquelle la balle aimerait bien rouler. Elle aimerait tellement y aller que dans certains cas, la balle (ou la particule) va traverser le pic (la barrière de potentiel) pour se retrouver de l'autre côté.

Comment cela se traduit-il mathématiquement ? En physique classique, déterministe, une particule n'a qu'une trajectoire, et va la suivre dans tous les cas. La probabilité de trouver la particule sur la trajectoire est de 1, elle est de 0 partout ailleurs. En physique quantique, les probabilités de présences sont plus éparpillées. Les barrières de potentiel ont pour effet de limiter grandement ces probabilités de présence, mais ne les annulent pas, ce qui fait que derrière une barrière de potentiel, on peut trouver une particule.

Si dans le monde macroscopique, les effets quantiques subsistaient nous pourrions franchir des murs ! Ce phénomène quantique qui permet de dépasser des barrières de potentiel s'appelle l'effet tunnel.

Les conséquences de l'effet tunnel dans la nature sont nombreuses, et ses applications diverses. Prenons quelques exemples.

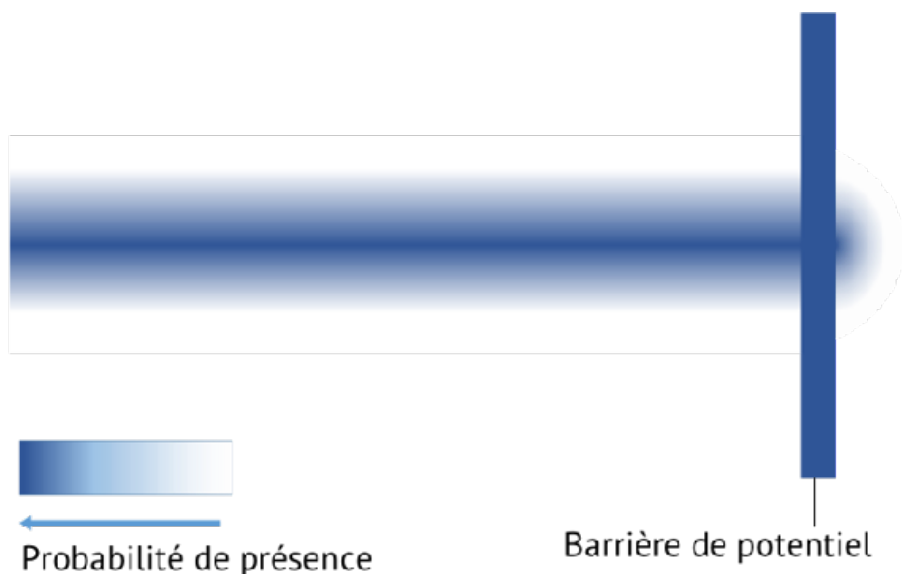


FIG. 5.3: Barrière de potentiel en physique quantique : la probabilité de trouver la particule derrière la barrière de potentiel est très faible mais non nulle.

Si le soleil brille, c'est parce que des réactions de fusion nucléaire se déroulent en son sein : des atomes de deutérium (un neutron, un proton) et de tritium (deux neutrons, un proton) fusionnent pour former un atome d'hélium, avec le rejet d'un neutron libre. Cette réaction provoque de grands dégagements d'énergie thermique et lumineuse.

Il faut savoir que la fusion nucléaire ne se fait pas de façon spontanée, les atomes d'hydrogène ne s'associent pas naturellement, leurs noyaux étant tous deux de charge positive. Une barrière empêche les deux noyaux de trop se rapprocher. Néanmoins, grâce à l'effet tunnel, il existe une probabilité pour que cette barrière soit franchie. Étant

donné le nombre colossal d'atomes susceptibles de fusionner ainsi dans l'astre, de tels phénomènes sont fréquents. Ce jeu de probabilités provoque un nombre de fusions non négligeables dans le soleil, qui brille !

Mais l'une des applications les plus connues de l'effet tunnel est la famille de microscopes qui porte son nom. Les microscopes à effet tunnel permettent d'observer des matériaux à l'échelle de l'atome. Dans un tel microscope, une pointe métallique ultra fine est approchée de l'objet à étudier. L'espace qui sépare les atomes de l'objet étudié et les atomes de la pointe agit comme une barrière de potentiel, franchissable seulement par effet tunnel. Par cet effet, des électrons sont échangés, un courant électrique se forme dans cet espace. En déplaçant la pointe et en étudiant le courant électrique créé en chacun des points que la pointe occupe, on peut cartographier atome par atome la surface d'un matériau.

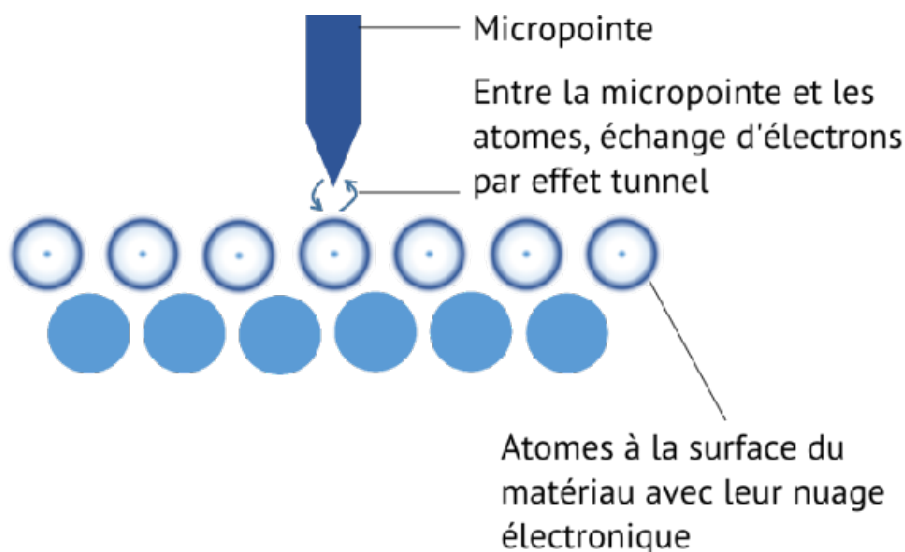


FIG. 5.4: Microscope à effet tunnel

Ce qu'il faut bien comprendre

- Les paradoxes quantiques sont l'interprétation des études mathématiques de la mécanique quantique, qui donnent des résultats totalement différents de ceux que l'on pourrait attendre dans le monde classique.
- En physique quantique, il faut se séparer du monde macroscopique, et faire confiance aux formalismes mathématiques. Les résultats trouvés seront parfois paradoxaux, souvent incompréhensibles, mais reflètent bien la réalité de l'infiniment petit.
- Aujourd'hui, la physique quantique dispose de modèles stables qui ont servi de base à bien d'autres branches et sous-branches de la physique. En particulier, la physique des particules a fait de prodigieux progrès, et est aujourd'hui un axe de recherche particulièrement actif.

La physique des particules justement, parlons-en. Quelle est la différence entre la physique quantique et la physique des particules ? A quoi sert un accélérateur de particules ? Comment découvre-t-on de nouvelles particules ?

Autant de questions auxquelles la prochaine partie de ce livre va

répondre.

La physique des particules

Les particules déjà connues

La physique des particules germa lorsque la communauté scientifique accepta d'une façon de plus en plus unanime que la matière était constituée de particules insécables : les atomes. Nous en avons déjà parlé : au XIXe siècle, la théorie atomiste prend de plus en plus d'importance jusqu'à être entérinée par Einstein au début du siècle dernier. Par la suite, on distingua noyau et nuage électronique, et on découvrit que l'atome n'était pas, malgré son nom, insécable. Le noyau est en effet divisible en nucléons (protons et neutrons).

Rappel sur les particules déjà connues

Quelles particules connaît-on alors à la genèse de la physique des particules ? Le proton, le neutron, l'électron. Tout l'univers, infiniment grand, est constitué d'un immense assemblage de ces briques, infiniment petites. Citons également le photon dont on a prouvé la nature corpusculaire.

Par la suite néanmoins, on découvrit que d'autres particules peuplent l'immensité de notre monde. Certaines ont d'ores et déjà été citées, comme les neutrinos qui comptent parmi les particules les plus abondantes de l'univers. Sans ces autres particules, la quasi-totalité des phénomènes physiques de l'infiniment petit ne pourraient pas avoir lieu (la radioactivité par exemple).

Dans cette dernière partie, nous allons retracer l'histoire de cette branche de la physique qui est l'une des plus actives actuellement.

Comment découvrir de nouvelles particules ?

La première question qui semble digne d'intérêt en physique des particules est tout simplement : comment en découvrir de nouvelles ? Comment les détecter ?

Par l'expérience

Nous avons d'ores et déjà étudié divers moyens de détecter des particules. On peut par exemple enregistrer leurs impacts sur une plaque photographique. Pour analyser leurs trajectoires, les chambres à brouillard ont souvent été utilisées.

Un phénomène étrange que les scientifiques ont observé dès la fabrication des premières chambres à brouillard est le fait que des traces s'y forment continuellement, sans que l'on y introduise au préalable des particules. Il y a ainsi un flux constant de particules dans l'atmosphère, qui nous traversent sans que nous nous en rendions compte. D'où viennent ces particules ? Pour le savoir, le physicien autrichien Victor Hess s'embarqua en 1912 sur une montgolfière avec une chambre à brouillard. Au péril de sa vie, il mesura l'intensité des rayonnements au fur et à mesure qu'il s'élevait en altitude. Plus celle-ci était élevée, plus le rayonnement était intense : celui-ci provenait donc de l'espace. On appela ce phénomène celui des rayons cosmiques. En 1929, il fut prouvé que ce rayonnement est composé de particules, pour certaines encore inconnues. Un rayon cosmique est à l'origine composé d'une particule très énergétique et très instable. Après avoir longtemps erré dans le vide interstellaire, celle-ci arrive sur la Terre et en entrant dans l'atmosphère va se désintégrer en des millions de particules de tous genres.

Aujourd'hui, nous sommes également capables de créer des particules via des accélérateurs de particules dont nous détaillerons le fonctionnement plus tard.

Par la théorie

En physique classique, l'expérience précède la théorie, dans la mesure où c'est suite à des expériences que l'on arrive à trouver une « formule ». C'est après de nombreuses observations que Galilée réussit à établir de nombreuses lois en mécanique.

En physique quantique, et de plus en plus aujourd'hui, la démarche scientifique se fait dans l'autre sens : grâce à une série de calculs, on prédit une loi physique, et parfois cette loi ne peut être vérifiée que des années plus tard. La dualité onde-particule de Louis de Broglie n'a pu être expérimentalement prouvée que des années après sa découverte « théorique ». Il en est de même pour le principe d'incertitude d'Heisenberg.

Comme on peut prédire des lois physiques par mathématique pure, avant même d'observation expérimentale, il est possible de prédire l'existence de particules avant même leur découverte. Mieux, on peut prédire toutes leurs caractéristiques. C'est ainsi grâce à des modèles mathématiques que la plupart des particules ont vu leur existence prédite avant d'être observées expérimentalement.

Voyons quelles particules ont pu être découvertes par ces deux moyens.

La découverte des quarks

Chadwick et Rutherford ont, entre 1919 et 1932, prouvé que le noyau peut être découpé en neutrons et protons, plus petits. On croyait que ces nouvelles particules faisaient partie de la famille des particules élémentaires, c'est-à-dire qu'elles sont insécables, on ne peut aller plus loin dans la décomposition de la matière.

Il s'est trouvé que la plongée dans l'infiniment petit n'était pas finie, on peut aller plus loin, couper les nucléons en d'autres particules plus petites : les quarks. C'est en 1964 que le physicien Murray Gell-Mann a, suite à de nombreux calculs théoriques, émis l'hypothèse de leur existence. Ce sont eux qui composent les nucléons, avec une taille environ 1000 fois inférieure à celle d'un proton ou d'un neutron.

Quarks up et down

Chaque nucléon est composé de trois quarks, mais pas de quarks

strictement identiques. En effet, il existe différents types de quarks (on parle poétiquement de différentes « saveurs » de quarks). Les quarks les plus communs sont nommés « up » et « down », ce sont eux qui composent les nucléons.

Ainsi, un proton est constitué de deux quarks up et d'un quark down. Un neutron est quant à lui composé de deux quarks down et d'un quark up. Ce sont les quarks qui donnent aux nucléons leur charge (positive ou nulle). Ainsi, si un proton a pour charge $+e$ et un neutron a pour charge 0 , c'est parce que les quarks possèdent les charges suivantes : $+2/3 e$ pour le quark up, $-1/3 e$ pour le quark down. Faites le calcul, le compte est bon !

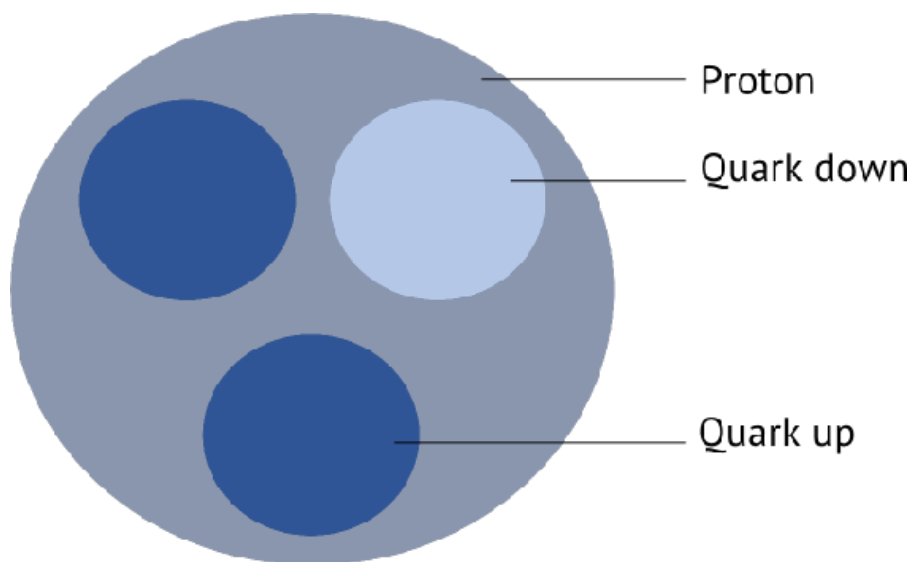


FIG. 1.1: composition d'un proton

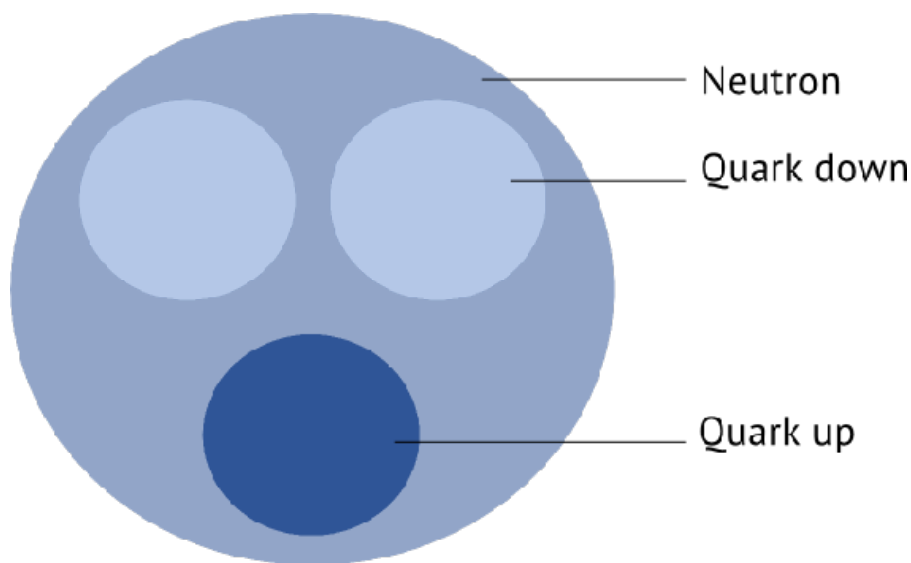


FIG. 1.2: composition d'un neutron

Les quarks peuvent rejoindre la famille des particules élémentaires : pour l'instant, on ne connaît aucune subdivision des quarks.

D'autres saveurs de quarks

Il existe d'autres types de quarks, autres que les quarks *up* et *down*. On a en effet découvert quatre autres saveurs de ces particules élémentaires. Ces autres quarks possèdent les mêmes caractéristiques que les deux premiers (notamment pour la charge), mais sont beaucoup plus massives, et donc instables.

Le quark *up* a ainsi deux cousins : les quarks *charm* et *top*. De même, on trouve à côté du quark *down* les quarks *strange* et *bottom*.

		Charge	Spin	Saveur
		$\frac{2}{3} e$	$\frac{1}{2}$	up
		$-\frac{1}{3} e$	$\frac{1}{2}$	down
		$\frac{2}{3} e$	$\frac{1}{2}$	charm
		$-\frac{1}{3} e$	$\frac{1}{2}$	strange
		$\frac{2}{3} e$	$\frac{1}{2}$	top
		$-\frac{1}{3} e$	$\frac{1}{2}$	bottom

Au-delà des quarks : les fermions

Récapitulons. Nous connaissons maintenant un certain nombre de particules élémentaires constitutives de la matière : les quarks, les électrons, ajoutons aussi les neutrinos qui apparaissent souvent aux côtés d'un électron.

L'ensemble de ces particules qui constituent la matière s'appellent les fermions. Nous en avons presque fait le tour.

En effet, nous avons omis de parler de quatre autres particules. Comme les quarks *up* et *down*, les électrons et les neutrinos ont des cousins, qui ont été observés dans les chaînes de désintégration des rayons cosmiques.

Électrons, muons et tau

Les muons et les tau (ou tauons) sont des particules qui font partie de la même famille que les électrons : ils possèdent les mêmes caractéristiques que ceux-ci mais sont beaucoup plus massifs et très instables. Ainsi, un tau est 3470 fois plus massif qu'un électron, et se désintègre au bout de 0,29 ps (10^{-12} s) en moyenne. Les produits de sa désintégration sont des quarks et ce qu'on appelle un « neutrino tau ».

Les muons sont 207 fois plus massifs que les électrons, ils se désintègrent après 2 μ s (10^{-6} s) d'existence en un électron et un « neutrino mu ».

massives qui se désintègrent en particules de première génération : quarks *charm* et *strange*, muon et neutrino mu.

- De même, la troisième génération de fermions est composée de particules encore plus massives et instables qui vont elles aussi se désintégrer, en particules de première et seconde génération.

La famille des fermions est au complet, avec ses sousfamilles et les liens entre elles.

		Famille leptons			
		Famille hadrons			
		Famille neutrinos			
		Neutrino Oscillation (θ_{ν})			
		Second Generation			
		Third Generation			

Néanmoins, ces fermions ne sont pas les seules particules élémentaires qui existent, nous allons voir qu'il en existe au moins deux fois plus !

« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi ! » Albert Einstein.

Ce qu'il faut bien comprendre

- Le protons et les neutrons, qui composent le noyau de chaque atome, ne sont pas les éléments les plus « petits » que l'on connaisse. En effet, ils se composent eux-mêmes de quarks.
- Les quarks peuvent avoir différentes « saveurs » : up, charm, top, down, bottom, strange.
- Toutes ces particules qui composent la matière sont regroupées dans la famille des fermions.
- Les scientifiques peuvent découvrir de nouvelles particules par deux moyens : l'expérience ou la théorie. De plus en plus, les physiciens découvrent des particules par le biais d'équations mathématiques, puis prouvent leur existence grâce à des expériences.

Découvrir de nouvelles particules par le biais d'équations mathématiques peut sembler, à première vue, être du bricolage de physiciens. Comment cela fonctionne-t-il concrètement ?

L'antimatière est l'exemple parfait du type de particules découvert grâce à la théorie mathématique.

L'antimatière

Lorsque nous avons détaillé les différents moyens dont les scientifiques disposent pour faire grossir le bestiaire des particules connues, nous avons mentionné la théorie pure. Mais comment s'y prennent-ils ? Une équation peut-elle vraiment donner les caractéristiques d'un corps ?

Souvenons-nous le l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{d\psi}{dt} = H\psi$$

En cherchant les solutions de l'équation de Schrödinger pour un atome, on peut retrouver les caractéristiques de cet atome et du nuage électronique qui entoure son noyau. En étudiant simplement un électron, on peut retrouver certaines de ses caractéristiques. Grâce à une version améliorée de l'équation de Schrödinger, les physiciens ont même découvert une nouvelle famille de particules...

L'équation de Dirac

Une équation de Schrödinger relativiste : l'équation de Dirac

Paul Dirac est un physicien anglais qui va compléter l'équation de Schrödinger, en lui ajoutant des paramètres liés à la théorie de la relativité d'Einstein. En effet, les électrons tournant à grande vitesse autour du noyau sont bien affectés par les lois de la relativité, qui stipule que des objets se déplaçant à des vitesses très élevées changent de comportement vis-à-vis du temps. La nouvelle équation qu'il a trouvée est parfaitement correcte et ne fait que préciser les travaux des physiciens avant lui. En incorporant à la fois des fonctions d'onde et des matrices, cette équation va prouver l'équivalence des deux modèles de représentation mathématique de l'atome. Mais il y a

autre chose.

Avec l'équation de Schrödinger simple, pour une énergie on trouve une unique fonction d'onde ψ , qui correspond aux caractéristiques d'une seule particule. Ce qui est étonnant dans l'équation de Dirac est que sa résolution ne donne pas une mais quatre fonctions d'onde. Bonne ou mauvaise nouvelle ? Un couple de fonctions d'onde correspond exactement à celles prédites par l'équation de Schrödinger simple, en y rajoutant une précision : la particule considérée peut être de spin up ou de spin down. L'existence du spin est ainsi mathématiquement confirmée.

Mais il reste un autre couple, lui beaucoup plus problématique, dans la mesure où les particules qui sont décrites par ces fonctions d'onde disposent d'une énergie négative. Il semblerait que nous ayons affaire à des solutions parasites. Elles proviennent de la forme générale de l'équation $E=mc^2 : E^2=(mc^2)^2+(pc)^2$. Les solutions de cette équation sont :

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2} \text{ et } E = -\sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

La prédiction de l'existence de l'antimatière

Deux solutions s'offraient aux scientifiques de l'époque : soit ils faisaient abstraction de ces solutions fantaisistes, soit ils acceptaient l'existence de telles particules aux propriétés très différentes de celles que nous connaissons.

Pour Dirac, ces particules à « énergie négative » existent, on peut les faire apparaître dans des conditions extrêmes. Cette intuition fut par la suite validée. Le nom de ces nouvelles particules ? Des antiparticules, constitutives de l'antimatière.

À chaque particule de matière connue il existe une particule

d'antimatière associée. Il existe ainsi des antiquarks et des antineutrinos. Le positon dont nous avons déjà parlé avec la radioactivité est l'antiparticule associée à l'électron. Le photon a pour particularité d'être sa propre antiparticule.

On note les antiparticules avec une barre. Ainsi, comme les quarks up se notent u , les antiquark up se notent $\bar{u}$.

Caractéristiques de l'antimatière

Quelles sont les caractéristiques de ces antiparticules ? Malgré leur nom, particules et antiparticules ne sont pas totalement opposées : elles sont affectées de la même manière que les particules par les lois de la physique, ont la même masse. On pourrait créer un univers d'antimatière ! Seule une chose change entre matière et antimatière : une particule et une antiparticule ont une charge opposée. Ainsi, un antiquark up a pour charge $-2/3$, un antiquark down $+1/3$. Un antiproton a donc une charge de $-e$.

Les antiparticules ont une durée de vie très faible dans notre univers. En effet, lorsqu'une particule d'antimatière rencontre sa particule de matière équivalente, une réaction particulière a lieu : le couple matière-antimatière s'anéantit.

Il ne faut pas comprendre cet anéantissement comme une destruction totale du couple particule-antiparticule. Le terme a été choisi, car dans cette réaction, la particule et son antiparticule homologue sont intégralement transformées en énergie selon la relation $E = mc^2$.

D'après cette relation, il y a une équivalence entre masse et énergie. Une particule de masse m renferme beaucoup d'énergie (mc^2 joules), et dans l'autre sens, on peut créer un ensemble de particules de masse m si l'on arrive à réunir en un point cette même quantité d'énergie mc^2 .

Lors de la collision d'un couple matière-antimatière de masse $2m$ (on additionne leurs masses), une quantité d'énergie de $2mc^2$ joules est

libérée sous la forme de n'importe quelle association de particules tant que certaines conditions sont respectées, par exemple :

- L'énergie est conservée dans la réaction : l'énergie des produits est bien égale à $2mc^2$.
- La charge du système est conservée : la charge du couple particule-antiparticule étant nulle, la charge des produits doit l'être aussi. En effet, une particule et une antiparticule ont des charges opposées, leur somme vaut donc zéro.

Les produits d'une réaction d'anéantissement sont souvent des photons, d'une énergie totale égale à $2mc^2$. Il arrive parfois qu'un autre couple particule-antiparticule soit formé. Au bout de quelques réactions matière-antimatière, on n'obtient que des particules « classiques » : photons, électrons, neutrinos.

La réaction matière-antimatière peut se faire dans les deux sens. En réunissant une quantité colossale d'énergie en un point, on peut créer un couple particule-antiparticule.

Ainsi, les antiparticules qui naissent dans l'univers meurent très rapidement, ou plutôt se transforment sans tarder en particules de matière et en photons. Il est ainsi très difficile d'étudier l'antimatière.

Une preuve expérimentale de l'existence de l'antimatière

Carl David Anderson est un physicien américain qui étudia les rayons cosmiques. Lors de ses études et en observant dans une chambre à brouillard les produits des rayons cosmiques, il remarqua en 1932 l'existence d'une particule aux mêmes propriétés de masse que l'électron, mais de charge opposée. L'existence du positon venait d'être démontrée, tout comme la réalité physique de l'antimatière. Les rayons cosmiques étant très énergétiques, ils donnent parfois naissance à des paires électron/positon.

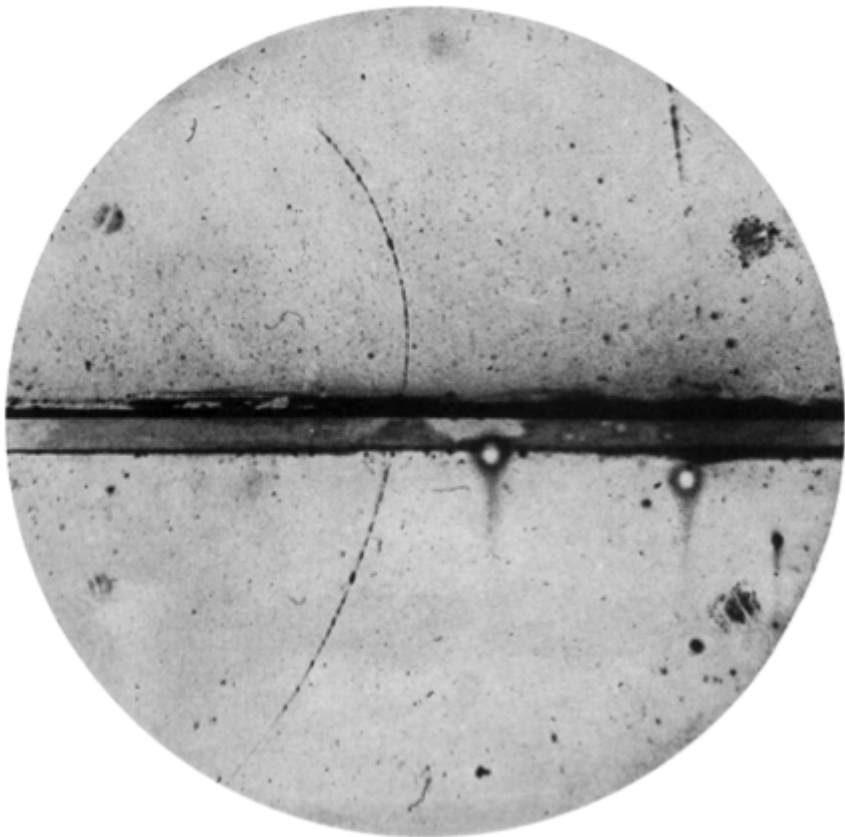


FIG. 2.1: *Première observation d'une antiparticule : le positon*

Voici la photo de la première détection d'un positon. Mais comment peut-on déterminer à partir d'un tel cliché que c'est une particule de charge $+e$ qui a laissé sa trace dans la chambre ? Pour connaître la charge d'une particule qui passe dans la chambre à brouillard, on y place un champ magnétique (un aimant). Ainsi, les particules sont déviées dans un sens ou dans l'autre selon leur charge (positive ou négative). L'amplitude de la déviation renseigne sur la valeur absolue de cette charge.

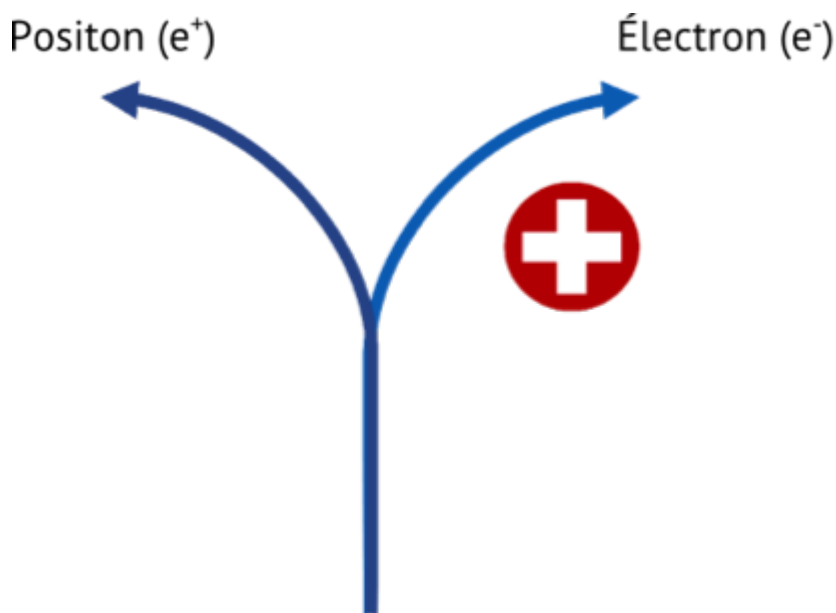


FIG. 2.2: mouvement d'un positon et d'un électron à proximité d'un aimant



FIG. 2.3: électron « venant d'en haut de l'image »

Néanmoins, cela ne donne pas le sens de déplacement de la particule. Cela pose problème, car une particule de charge négative venant du haut de l'image a en effet la même trace qu'une particule de charge

positive venant du bas de l'image. Comment alors faire une différenciation ?

L'amplitude d'une déviation varie selon deux facteurs : plus une particule est chargée, plus elle sera déviée. De plus, plus elle est lente, plus la dérive de la particule sera importante. Pour résoudre le problème précédent, les scientifiques ont placé au centre de la chambre à brouillard une plaque de plomb (que l'on voit horizontalement sur l'image). La plaque de plomb ralentit les particules sans les absorber, et en sortant de la plaque, la courbure de leur trajectoire est plus importante. Ainsi, sur l'image, on peut observer que la particule vient du bas, c'est en effet dans la partie haute qu'elle a ralenti et a été plus déviée. Sachant cela, on peut bien affirmer que cette particule a une charge positive.

Irène Joliot-Curie (fille de Pierre et Marie Curie) lors de son étude de la radioactivité β avec l'aide de son mari Frédéric, montra que le positon est un produit de la radioactivité β^+ .

On peut tirer des conclusions physiques de l'équation de Dirac non seulement avec des particules simples (comme les électrons) mais aussi avec des particules plus complexes comme les protons. Cette conjecture fut prouvée en 1955 par des expériences réalisées sur l'accélérateur de particules Bevatron. En bombardant une cible avec des protons très énergétiques, on peut en effet donner naissance à une paire proton-antiproton. En 1956 l'antineutron fut mis en évidence avec le même accélérateur. En 1995 le premier atome d'anti-hydrogène (composé d'un antiproton et d'un positon) fut créé au Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN).

Des applications à l'antimatière

En médecine

Les particules d'antimatière trouvent une application dans le domaine de l'imagerie médicale. En effet, la tomographie par émission de

positons (TEP) permet de localiser des tumeurs grâce au phénomène d'anéantissement. Expliquons.

Les cellules cancéreuses sont de grandes consommatrices de glucose. Pour détecter la présence d'une tumeur chez un patient, on injecte dans son sang un traceur radioactif qui, en s'associant au glucose, va se concentrer dans la tumeur. Très rapidement, les atomes radioactifs qui servent de traceurs vont se désintégrer (c'est une désintégration β^+ qui se produit). Par cette désintégration, un positon est émis. Celui-ci va vite être anéanti par un électron, donnant naissance à deux photons qui partent dans des directions opposées. Des capteurs enregistrant les trajectoires des photons peuvent nous renseigner sur le lieu de l'anéantissement. Les parties du corps où le plus d'anéantissemments ont lieu sont celles où le traceur est concentré, et donc éventuellement dans les zones cancéreuses.

Dans le domaine de l'énergie

La réaction matière-antimatière est la seule réaction où la totalité de la masse des particules est transformée en énergie. Pour comparer, lors d'une réaction nucléaire, un millième seulement de la masse des réactifs se transforme en énergie. Cette proportion est abaissée à un milliardième pour la combustion d'un minerai fossile comme le charbon.

Ainsi, on peut tirer d'une quantité minime d'antimatière une énergie colossale. D'après les recherches de la NASA, il suffirait de réunir 10mg d'antimatière pour effectuer un voyage Terre-Mars.

On pourrait donc utiliser de l'antimatière pour stocker de l'énergie. L'opération consisterait à transformer de l'énergie en antimatière, que l'on sait aujourd'hui stocker dans un environnement sous vide, puis on récupère l'énergie stockée par des réactions matière-antimatière simples.

Le problème provient du fait que le rendement d'une telle opération est très faible : pour créer une quantité d'antimatière équivalente à un joule d'énergie, il nous faut actuellement 100 millions de joules. De telles applications relèvent ainsi plus de la science-fiction.

Avec la découverte de l'antimatière, la liste des particules élémentaires grossit. On peut même dire que la liste a presque doublé de taille. Néanmoins, il nous reste encore d'autres familles de particules à découvrir...

« Dieu a utilisé une très belle mathématique en créant le monde. »
Paul Dirac.

Ce qu'il faut bien comprendre

- L'antimatière a été découverte par Dirac en résolvant une équation mathématique : une partie des solutions semblaient être des solutions parasites. En réalité, ces solutions correspondaient à quelque chose de très concret : les particules d'antimatière.
- L'opposition matière/antimatière se fait au niveau de la charge des particules.
- Une particule et son antiparticule s'annihilent lorsqu'elles rentrent en contact et produisent beaucoup d'énergie (sous forme de photons).
- Sur Terre, on ne trouve de l'antimatière que dans les rayons cosmiques ou en laboratoire grâce aux accélérateurs de particules.

Faisons une pause dans l'agrandissement du bestiaire des particules élémentaires, et étudions maintenant leurs interactions. Pour mieux comprendre le comportement des quarks qui composent les particules, les scientifiques ont élaboré un principe assez intuitif : la chromodynamique quantique.

La chromodynamique quantique

Nous avons déjà parlé du principe d'exclusion de Pauli, dans le cadre du modèle atomiste de Bohr : d'après ce principe, deux électrons d'un même atome ne peuvent pas être dans le même état quantique. Ce principe s'étend, au-delà des électrons, à toutes les autres particules : deux particules identiques, dans le même état, doivent garder une certaine distance. Ainsi, un espace sépare toujours deux protons dans un noyau ; ils se repoussent s'ils sont trop proches.

Présentation

Ce principe devrait alors s'appliquer aux quarks : deux quarks identiques ne peuvent pas se situer l'un à côté de l'autre. C'est pourtant ce qui se passe dans un nucléon : il y a deux quarks up dans un proton et deux quarks down dans un neutron. Quelque chose doit distinguer ces deux quarks pour qu'ils ne soient pas dans le même état quantique. Une branche de la physique quantique a permis d'expliquer cette étonnante proximité, la chromodynamique quantique (de $\chi\rho\omega\mu\alpha$ – kroma-, « couleur » en grec). D'après cette théorie, les particules élémentaires ont en plus de leurs caractéristiques classiques (masse, charge, etc.) une autre particularité : la charge de couleur.

Les particules de matière peuvent avoir comme charge de couleur soit bleu, soit vert, soit rouge. Ce sont les trois couleurs primaires. Les particules d'antimatière, elles, ont pour charge de couleur anti-bleu, anti-vert ou anti-rouge. Les particules ne sont pas véritablement colorées, la charge de couleur n'a physiquement rien à voir avec la notion de couleurs, mais cette analogie permet de tirer des conclusions intéressantes.

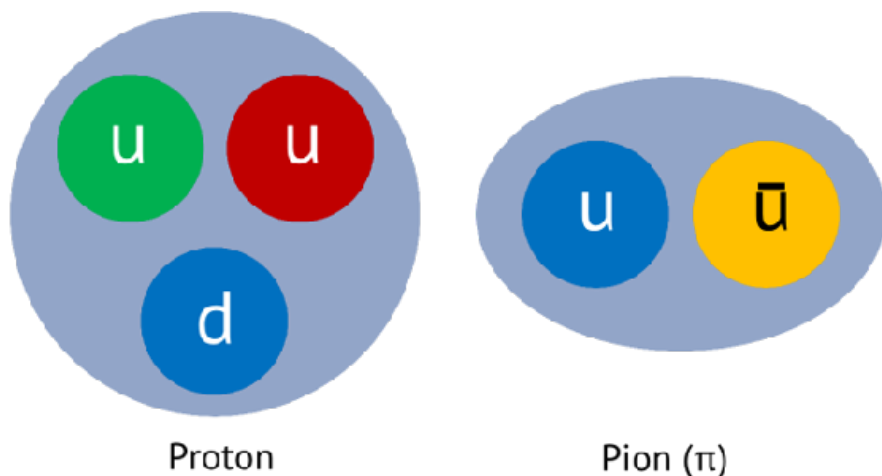
D'après les lois de la chromodynamique quantique, un ensemble de particules élémentaires ne peut être stable que si la somme des

charges de couleur des particules élémentaires la composant est : blanc.

Le blanc est la somme des trois couleurs primaires vert, bleu, rouge. Ainsi, le proton peut exister parce que chaque quark le composant a une charge de couleur différente. Il existe d'autres arrangements de particules élémentaires stables. Par exemple, à l'assemblage d'une particule de matière avec son homologue d'antimatière et stable. En effet, un assemblage de rouge et d'anti-rouge forme du blanc. Vert et anti-vert forme du blanc également. Ces assemblages d'une particule de matière avec son homologue d'antimatière sont appelés

« mésons ». Plus particulièrement, les assemblages $u\bar{d}$ (up/antidown) et $\bar{u}d$ (down/antiup) sont appelés les pions, et notés par la lettre grecque pi (π).

Par analogie avec les couleurs dans le monde macroscopique, on représente les anti-couleurs par des couleurs complémentaires : l'antibleu, l'antivert et l'antirouge peuvent se représenter respectivement avec du jaune, du magenta et du cyan.



Vert + Rouge + Bleu = Blanc Bleu + Anti-bleu = Blanc

FIG. 3.1: les compositions d'un proton et d'un pion

Une conséquence de cette loi est que les quarks ne sont jamais observés seuls : ils sont toujours accompagnés d'un ou de plusieurs

autres quarks de sorte que la somme de leurs charges de couleur vaut « blanc » (on dit que la somme des charges de couleur est nulle).

La force forte et les gluons

Nous pourrions nous dire que les lois de la chromodynamique quantique ne s'appliquent que dans des conditions « normales ». Qu'en est-il pour des conditions extrêmes ? Imaginons par exemple que l'on tente de séparer les deux quarks constitutifs d'un pion : les quarks s'éloignent jusqu'à ce que la force qui les réunit ne soit pas assez puissante pour les maintenir ensemble.

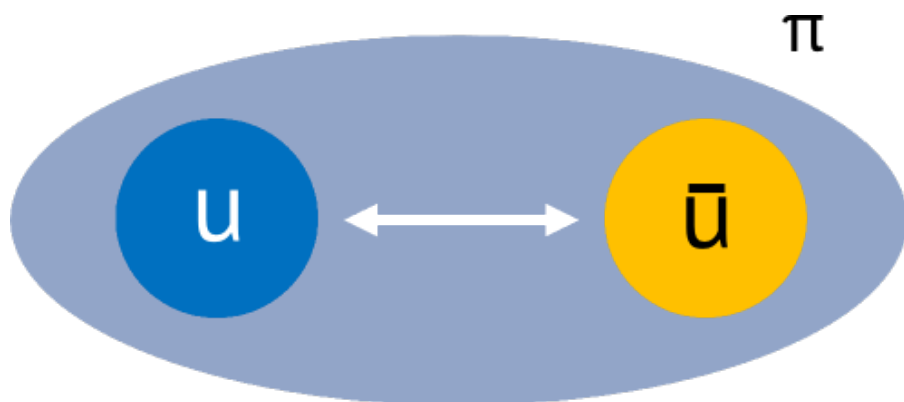


FIG. 3.2: séparation de 2 quarks dans un pion

On pourrait alors observer un quark et un antiquark séparés ! Il se trouve que non. L'énergie utilisée pour séparer les quarks va être transformée en matière selon la relation $E = mc^2$: un autre couple quark/antiquark se forme pour combler le vide laissé : on obtient deux pions. Ce phénomène s'appelle le confinement.

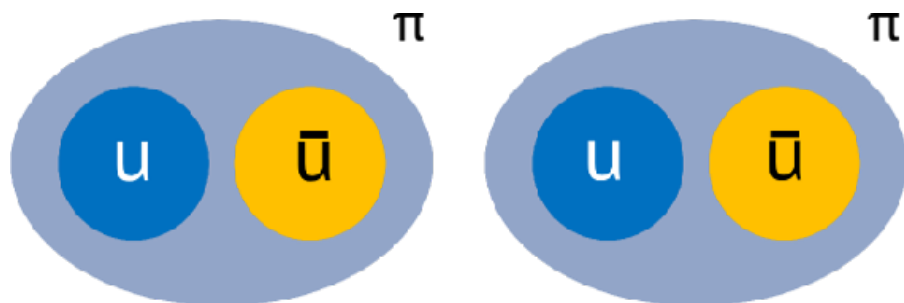


FIG. 3.3: Confinement des quarks

Ce phénomène est inimaginable en physique classique : on ne saurait faire de même avec la force gravitationnelle ou électromagnétique (rien n'apparaît lorsque l'on sépare deux aimants !).

Quelque chose permet de maintenir les quarks côte à côte, une sorte de corde qui les lie. Cette corde est une particule qui colle les quarks entre eux : le gluon. Plutôt devrions-nous dire les gluons, il en existe en effet huit types différents. On les représente par une ligne enroulée comme un ressort, liant deux quarks. En absorbant ou en émettant un gluon, un quark peut changer sa charge de couleur.

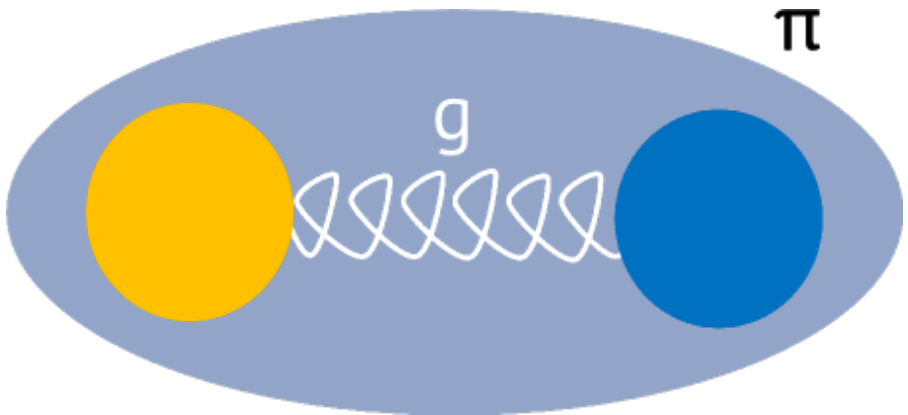


FIG. 3.4: représentation d'un gluon

Cette force véhiculée par les quarks s'appelle la force forte. Elle est en effet plus intense que la force électromagnétique qui aurait tendance à séparer les constituants des nucléons.

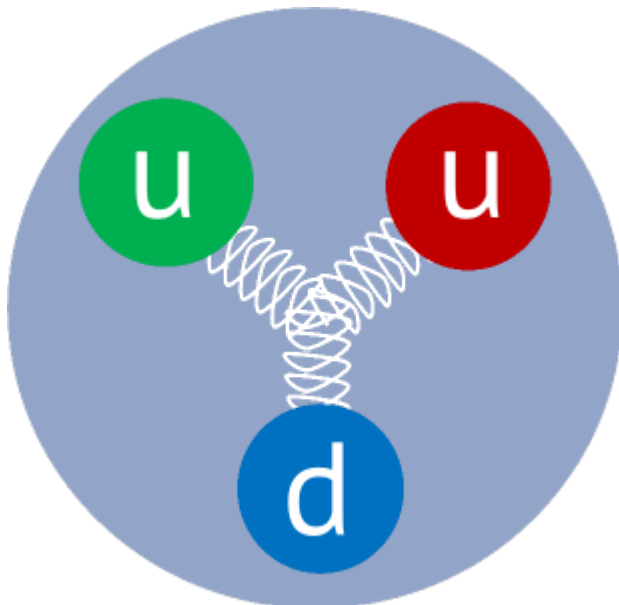


FIG. 3.5: *Gluons et force forte dans un proton*

L'échange de pions

Le même problème pourrait se poser pour le noyau lui-même : deux protons sont repoussés l'un de l'autre par la force électrostatique. Qu'est ce qui assure alors la cohérence du noyau ? Une force plus puissante que la force électrostatique doit venir contrecarrer cette répulsion. Ce n'est pas la force forte, car les gluons qui en sont les médiateurs n'agissent que sur des particules disposant d'une charge de couleur (et celle des nucléons est nulle).

En 1934, le physicien japonais Hideki Yukawa décrit la théorie de l'interaction nucléaire. D'après ses calculs, les nucléons d'un noyau émettent et absorbent des pions, et cet échange de pions permet aux nucléons de se maintenir à des distances constantes : à des distances inférieures à 0,7 fm ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$) la force nucléaire est répulsive, au-delà de 1 fm elle est attractive, et la distance entre deux nucléons est ainsi maintenue aux alentours de 0,9 fm.

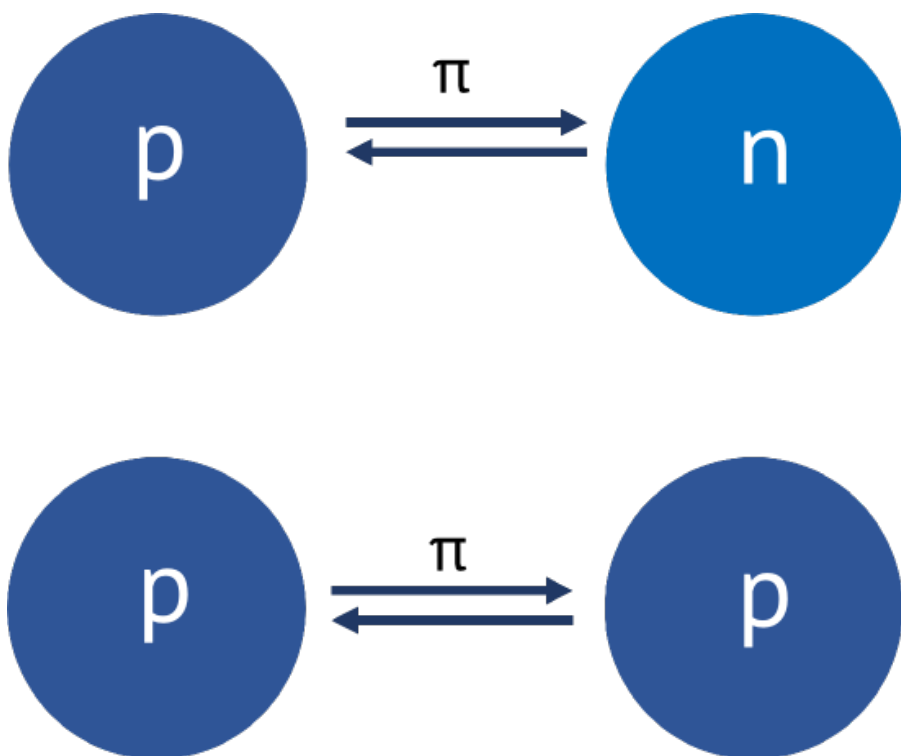


FIG. 3.6: Échange de pions permettant l'interaction nucléaire entre deux nucléons

Le bestiaire des particules élémentaires s'agrandit, avec notamment l'arrivée des gluons. Ce que nous avons également découvert est la capacité qu'ont les particules ou les groupes de particules à transmettre une force : la force forte est véhiculée par les gluons, et les pions sont les médiateurs de la force nucléaire.

« Si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'informations dans le minimum de mots ? Je pense que c'est l'hypothèse atomique que toutes les choses sont faites d'atomes – petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes les autres et se repoussant lorsque l'on veut les faire

se pénétrer. Dans cette seule phrase, vous verrez qu'il y a une énorme quantité d'information sur le monde, si on lui applique un peu d'imagination et de réflexion. » Richard Feynman.

Ce qu'il faut bien comprendre

- Les scientifiques ont imaginé un moyen intuitif de formaliser le comportement des quarks en fonction de leur nature. Ils attribuent une couleur à chaque quark de telle sorte que les combinaisons de quarks qui se regroupent ensemble forment toujours du blanc.
- Il est impossible de séparer deux quarks : c'est ce qu'on appelle le confinement.
- Le médiateur de cette force qui lie les quarks s'appelle le gluon.
- De la même manière, le médiateur de la force qui permet aux nucléons du noyau de rester à distance constante les uns des autres s'appelle le pion. Ce sont donc les pions qui permettent au noyau de ne pas s'effondrer sur lui-même. En effet sans cette force nucléaire, les protons – de même charge – se repousseraient sans cesse comme deux aimants.

Feynman formalisa visuellement les interactions entre les différentes particules grâce aux célèbres diagrammes qui portent son nom. Voyons en quoi les diagrammes de Feynman peuvent nous servir à mieux comprendre la physique des particules.

Le modèle standard

Avec la découverte des gluons et l'hypothèse de la force forte, puis avec l'explication des interactions nucléaires, les scientifiques comprirent que si à notre échelle les forces s'expriment sous forme de champs (comme le champ gravitationnel et le champ électrostatique), ce n'était pas le cas à l'échelle de l'infiniment petit. C'est l'échange de particules qui permet la naissance de ces champs. Nous avons déjà justifié ce fait pour la force forte : peut-on le faire pour les autres, comme la force électromagnétique, qui explique les phénomènes d'électrostatique et de magnétisme ?

L'électrodynamique quantique

Le photon, un boson

Toujours en se basant sur des calculs théoriques, en assimilant des champs à des échanges de particules, les physiciens se rendirent compte que la force électromagnétique était, comme beaucoup de choses dans l'infiniment petit, quantifiée. Les interactions entre deux particules chargées se fait avec des quanta, qui ne sont rien d'autre que des photons. Ce sont les photons qui sont les bosons médiateurs de la force électromagnétique : des échanges de photons entre particules sont à l'origine de cette force à l'échelle quantique.

Il est assez difficile de se représenter comment des photons peuvent ainsi être à l'origine d'un champ. Pour donner un aspect visuel à la chose, le physicien américain Richard Feynman inventa un moyen particulièrement pratique pour représenter l'interaction entre particules : les diagrammes qui portent son nom.

Les diagrammes de Feynman

D'une manière très simple, ils présentent l'évolution de différentes particules en fonction du temps. On le lit généralement de gauche à

droite. Un fermion est représenté par une ligne continue, droite. Ainsi, un électron est représenté ainsi :

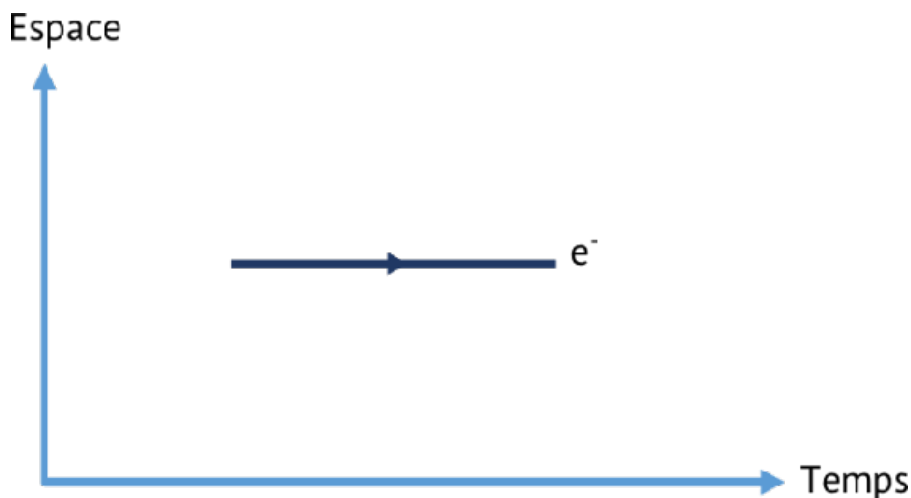


FIG. 4.1: *diagramme de Feynman d'un électron*

Les particules de matière sont représentées avec une flèche pointant dans le même sens que le temps. Au contraire, les particules d'antimatière sont représentées avec une flèche pointant dans le sens contraire. On représente donc ainsi un positon :

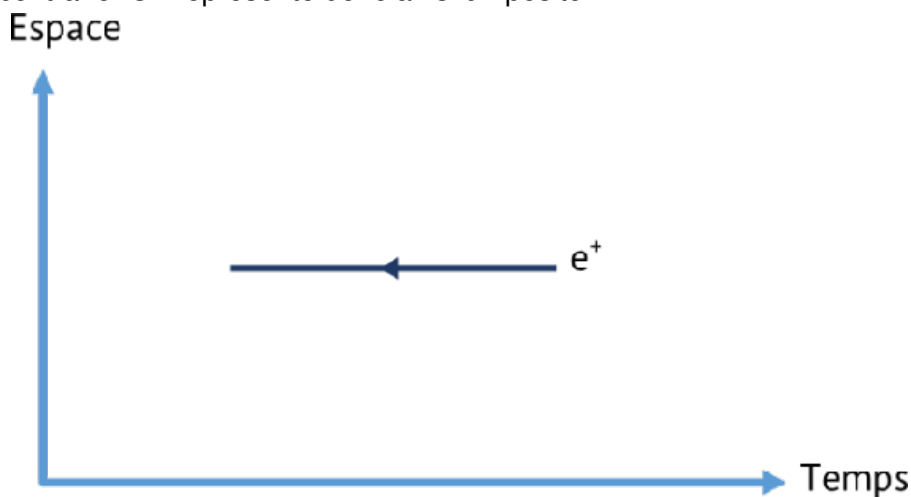


FIG. 4.2: *représentation d'un positon (anti-électron)*

Cela ne veut pas dire que le positon se déplace dans le sens contraire

d'un électron, mais est juste une notation permettant de différencier matière et antimatière.

Les bosons sont eux représentés sous la forme d'une courbe, ondulée. Un photon (γ) est représenté ainsi.

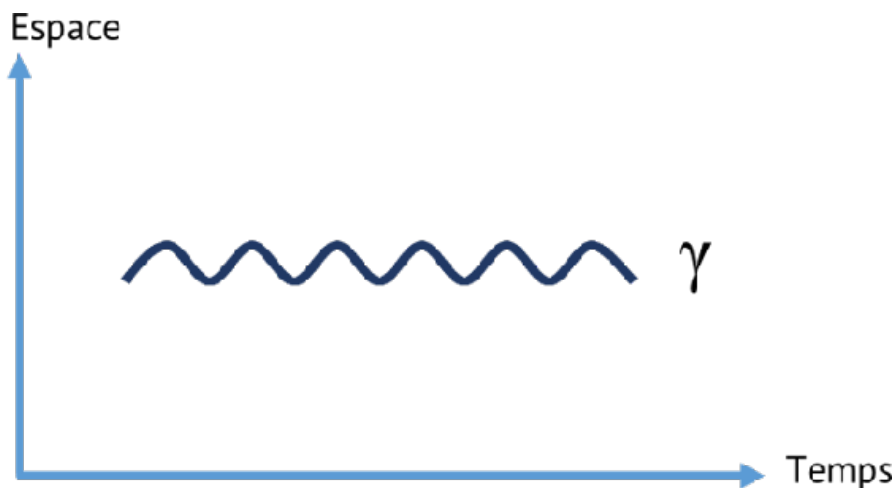


FIG. 4.3: représentation d'un boson

De plus, il ne faut pas traiter de manière rigoureuse l'espace, représenté ici sous la forme d'un axe vertical. L'espace considéré est en effet en 3 dimensions, et l'espacement entre deux particules que l'on pourrait représenter dans un diagramme de Feynman est arbitraire.

Ce sont en effet les interactions entre les particules qui sont importantes. Par exemple, représentons une interaction possible entre un électron et un positon : ils se combinent et s'anéantissent pour former de l'énergie pure sous la forme d'un photon qui va devenir un autre couple électron/positon.

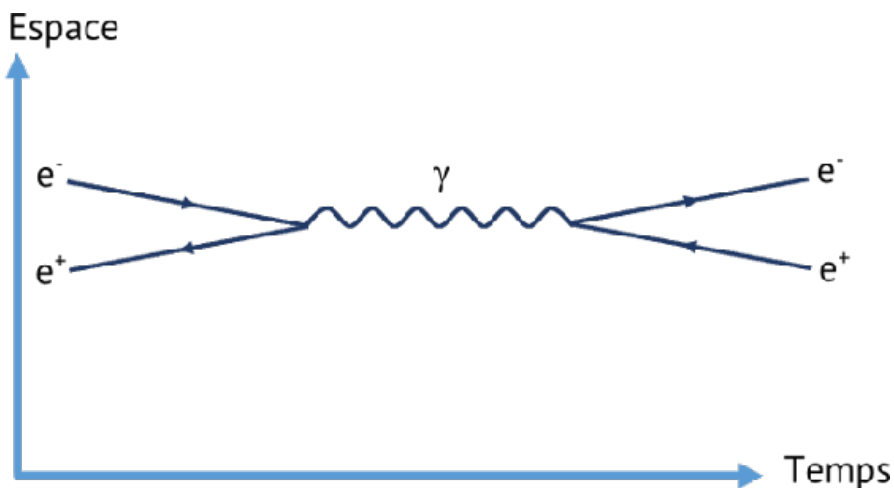


FIG. 4.4: *anéantissement d'un positon et d'un électron*

Retour à l'électrodynamique quantique

L'usage principal des diagrammes de Feynman est en électrodynamique quantique. Il est facile grâce à eux de représenter certains phénomènes étranges en quelques coups de crayon. Ainsi, un électron peut être dévié en émettant un photon.

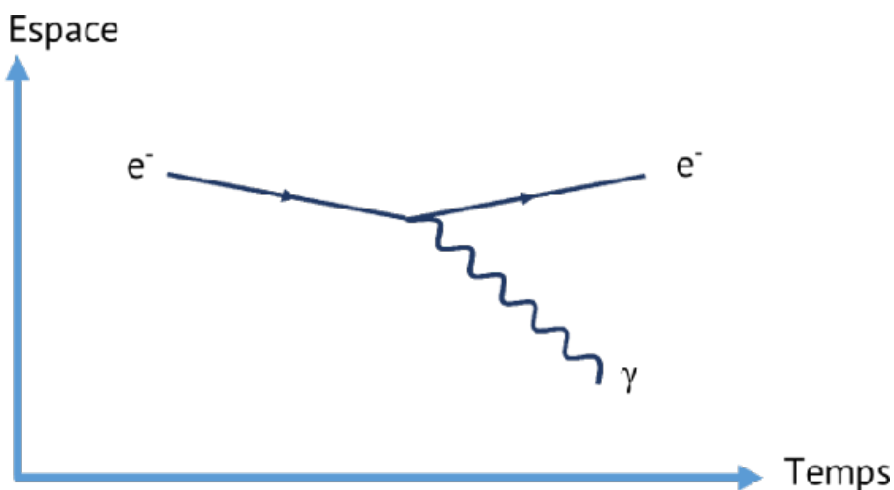


FIG. 4.5: *Déviation d'un électron par émission d'un photon*

Lorsque deux particules de charges opposées s'attirent, elles s'échangent des photons et en émettent d'autres, ce qui mène à leur rencontre.

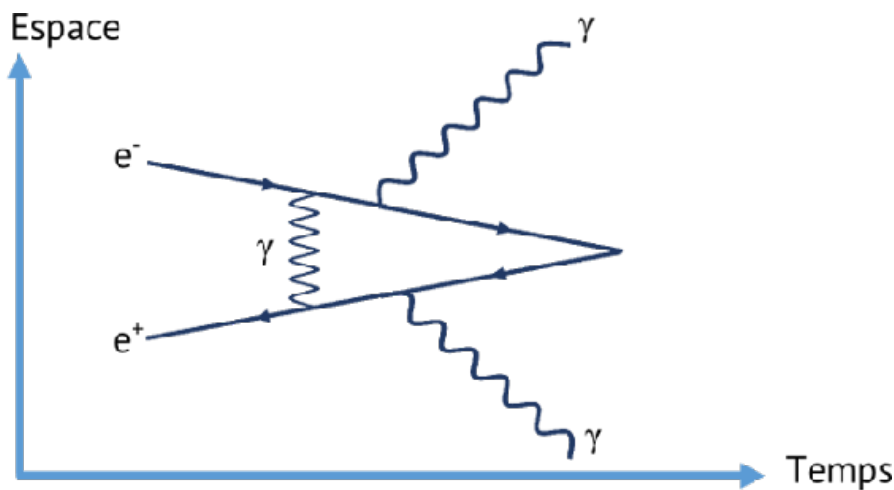


FIG. 4.6: Rencontre d'un électron et d'un positon par émission et échange de photons

L'interaction faible

Les bosons W

La physique des particules est comme toute autre branche de la physique : elle vise à l'élaboration de modèles toujours plus précis, se rapprochant au plus près de la réalité. Souvent ce perfectionnement se fait grâce à la complexification de modèles déjà existants. Par exemple, les différents modèles de l'atome sont des améliorations des modèles précédents, et l'atome de Chadwick n'est qu'une précision de l'atome de Rutherford.

La description des interactions entre particules sont elles aussi sujettes au perfectionnement : prenons l'exemple de la radioactivité : β

+. Lors de la découverte de ce mode de désintégration radioactive, voici comment le phénomène fut décrit : un proton se transforme en neutron par émission d'un positon.

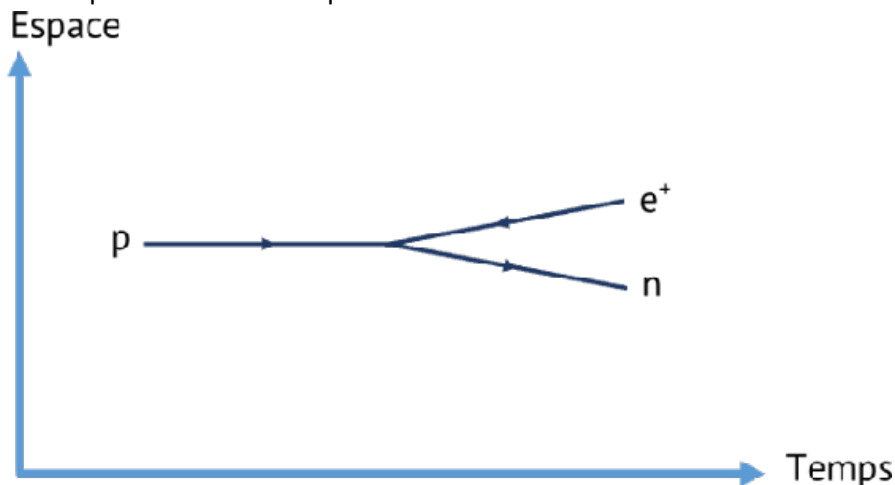


FIG. 4.7: Première représentation de la désintégration radioactive bêta

+

Puis, pour corriger le problème de la conservation de l'énergie, le modèle fut amélioré : un neutrino électronique est aussi émis lors de la désintégration.

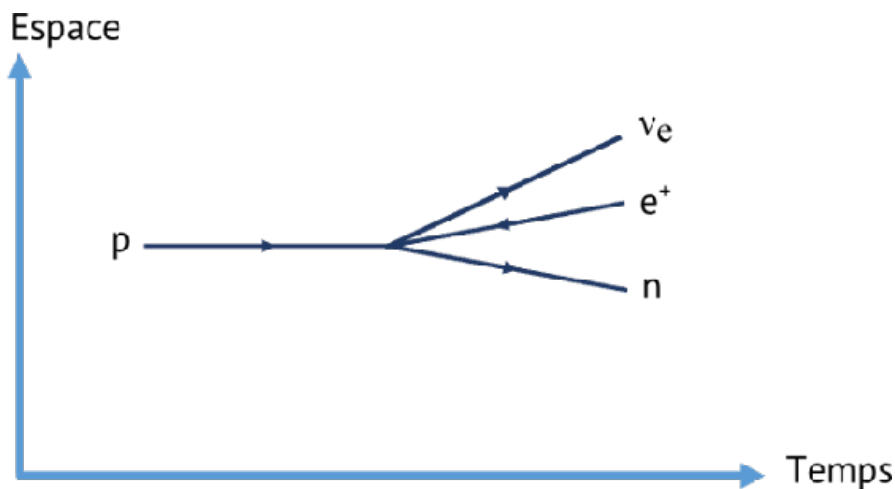


FIG. 4.8: amélioration du modèle de désintégration précédent

Des calculs théoriques démontrèrent qu'il existe un intermédiaire : le boson W^+ , émis lors de la transformation du proton en neutron, il se désintègre par la suite après une durée de vie très faible (de l'ordre de 10^{-25} s) en un positon et un neutrino électronique.

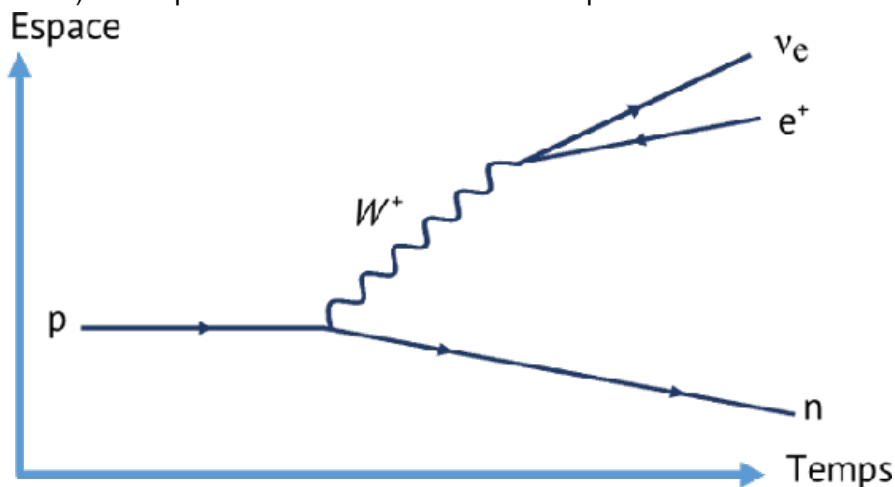


FIG. 4.9: amélioration successive du modèle de désintégration

Lorsque les scientifiques émirent l'hypothèse des quarks, le modèle fut encore amélioré : en effet, lorsqu'un proton se transforme en neutron, ce n'est qu'un quark up qui se transforme en quark down. La radioactivité β^+ peut se décrire ainsi :

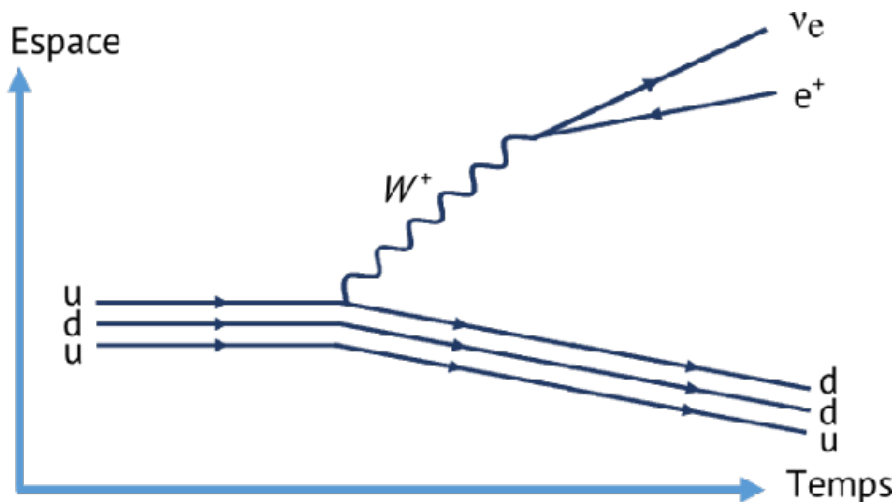


FIG. 4.10: amélioration finale du modèle et interprétation moderne de

Pour la radioactivité β^- , le phénomène est similaire, mais le boson émis est un boson W^- , antiparticule du boson W^+ . Ainsi, les bosons W ont pour propriété de pouvoir changer la saveur des quarks, et cela non seulement pour les quarks up et down, mais aussi pour les autres saveurs.

En réalité, les bosons W ne sont pas que des particules intermédiaires. Comme tout boson, ce sont des particules médiatrices d'une force. Les scientifiques ont nommé la force qui permet cette désintégration β la force faible.

Le boson Z

Les neutrinos ont une masse quasi nulle, et sont donc insensibles à la force gravitationnelle, ont une charge nulle donc ne sont pas affectés par la force électromagnétique, et ils ne possèdent pas de charge de couleur, et par conséquent sont insensibles à la force forte. Leurs interactions avec la matière sont très faibles, mais elles ne sont pas nulles. Lorsqu'un neutrino percute un électron, il peut le mettre en mouvement : c'est ainsi que l'on arrive à les détecter. Mais comment de l'énergie est-elle ainsi transmise du neutrino à l'électron ? Une force doit bien permettre cette interaction ! Cette force, c'est encore la force faible, par l'intermédiaire d'un dernier boson, le boson Z^0 qui a une charge nulle et est sa propre antiparticule.

Les forces fondamentales

Forces fondamentales

Ainsi, toute force reflète à l'échelle microscopique l'échange de particules, les bosons. Pour décrire l'ensemble des phénomènes de la nature, quatre forces suffisent : la force forte, la force faible, la force électromagnétique et enfin la force gravitationnelle. À chacune de ces

forces est associé un boson. Pour ce qui est de la force gravitationnelle, son boson associé n'a toujours pas été découvert, mais les scientifiques ont émis l'hypothèse d'un « graviton » qui en serait le médiateur.

		Intensité	Portée	Relative		
		Gravitationnelle	Infinie	1		
		Électromagnétique	Infinie	1/137		
		Faible	10 ⁻¹⁶ m	10 ⁻²⁵		
		Fort	10 ⁻¹³ m	1		
		Bosons				
		Graviton				
		Photon				
		Gluon				
		Bosons				
		W ⁺ et W ⁻				
		Z ⁰				
		Graviton (hypothétique)				

Le modèle standard

Avec toutes ces découvertes, un modèle a été établi permettant de décrire l'ensemble de la physique des particules. En effet, avec la liste des particules élémentaires, leurs caractéristiques et les forces qui les font interagir, il est possible de décrire tous les comportements des particules élémentaires. Ce modèle a modestement été nommé « Modèle Standard ».

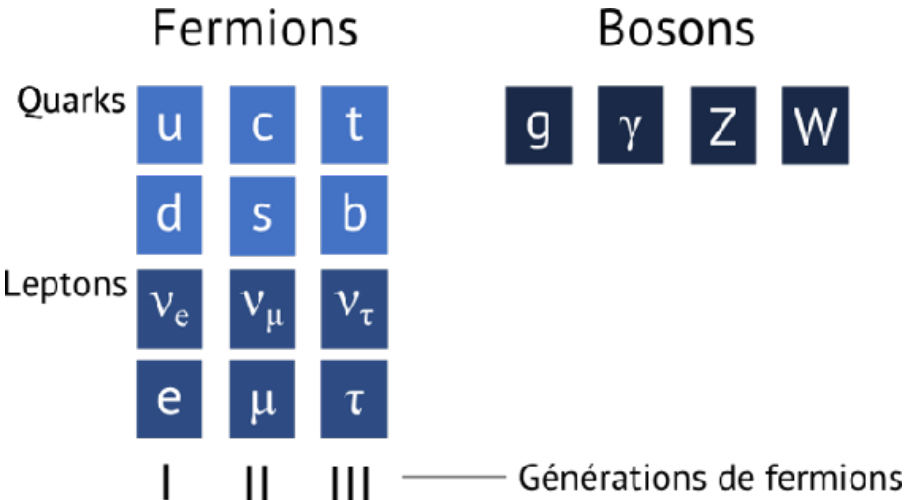


FIG. 4.11: Particules du Modèle Standard

Réunir les forces fondamentales

Le défi actuel consiste à réunir les différentes forces fondamentales pour décrire les interactions avec le moins d'équations possibles : le modèle serait ainsi plus pur.

Par des calculs théoriques, des scientifiques ont démontré que les forces faibles et électromagnétique ont une origine commune, et peuvent se regrouper en une unique force : la force électrofaible. Un rêve de physicien serait de regrouper les trois interactions forte, faible et électromagnétique en une seule : on appelle les théories qui traitent de ce sujet les théories de Grande Unification. Néanmoins, aucune n'a totalement séduit les scientifiques à ce jour.

« Nous avons toujours eu (chut, chut, fermez les portes !), nous avons toujours eu beaucoup de mal à comprendre l'image du monde que nous offre la mécanique quantique. Du moins, en ce qui me concerne, bien que je sois suffisamment âgé, je ne suis pas encore parvenu me convaincre que tous ces trucs-là étaient évidents. OK, ça m'énerve toujours. Ainsi quelques étudiants plus jeunes... Vous savez ce que c'est : à chaque nouvelle idée, il faut une ou deux générations pour constater qu'elle ne pose pas de vraie difficulté. Il n'est toujours pas évident pour moi qu'il n'y a pas de vrai problème. Je ne peux pas définir le vrai problème donc je soupçonne qu'il n'y a pas de vrai problème mais je ne suis pas sûr qu'il n'y ait pas de vrai problème. »
Richard Feynman.

Ce qu'il faut bien comprendre

- Les interactions entre les particules (par exemple les interactions électromagnétiques) sont toujours dues à des échanges d'autres particules appelées bosons.
- Les 4 forces de la nature (la force forte, la force faible, la force électromagnétique et la force gravitationnelle) sont chacune associée à un boson, bien que le boson de la force gravitationnelle n'ait toujours pas été découvert.
- Aujourd'hui, l'un des enjeux en physique des particules est d'arriver à unifier mathématiquement les différentes forces.

Pour trouver de nouvelles particules mais aussi pour comprendre leur comportement, les scientifiques ont mis au point des accélérateurs de particules.

Ces instruments, qui peuvent atteindre des tailles colossales, permettent d'étudier les particules dans des conditions très particulières. Voyons exactement à quoi tout cela peut servir et comment cela fonctionne.

À la recherche de nouvelles particules

Présentation des accélérateurs de particules

Les premiers accélérateurs

Il est souvent intéressant d'observer la collision de plusieurs particules pour obtenir des résultats expérimentaux sur les caractéristiques de la matière. Rappelons-nous que c'est par de telles collisions que l'existence du noyau fut démontrée par Rutherford, et que Chadwick émit l'hypothèse du neutron. Le noyau peut même voir sa composition altérée lors d'expériences de ce type. En 1919, en bombardant avec des particules alpha des atomes d'azote, Rutherford obtint des atomes d'oxygène. Si l'on bombarde un atome avec des particules qui ont beaucoup d'énergie, on peut même espérer disloquer le noyau : protons et neutrons sont éjectés.

Comment fait-on alors pour obtenir des particules très énergétiques, pour que la collision soit la plus violente possible ? On peut utiliser deux méthodes : soit on utilise des particules lourdes, soit on utilise des particules animées d'une grande vitesse. Par analogie, une collision entre deux camions sera plus violente qu'une collision entre deux voitures. De plus, plus la vitesse des véhicules est élevée, plus la collision sera violente.

Ainsi, les physiciens du début du XX^e siècle ont tenté de trouver des moyens d'accélérer des particules, pour pouvoir les propulser à la plus grande vitesse possible sur d'autres particules. Une méthode déjà connue était d'utiliser des champs électriques. En plaçant une particule chargée entre deux plaques de charges opposées, la particule va se déplacer, et accélérer au fur et à mesure qu'elle s'approche de la plaque de charge opposée. Les premiers « accélérateurs de particules » furent ainsi des canons à électrons.

Dans un canon à électrons, des électrons sont produits par un filament

dans lequel on fait passer un courant. Une partie des électrons produits passe entre les deux plaques : de charge négative, ils sont repoussés par la première plaque et attirés par la seconde. Ainsi, les électrons passent d'une vitesse quasi nulle à une vitesse très élevée.

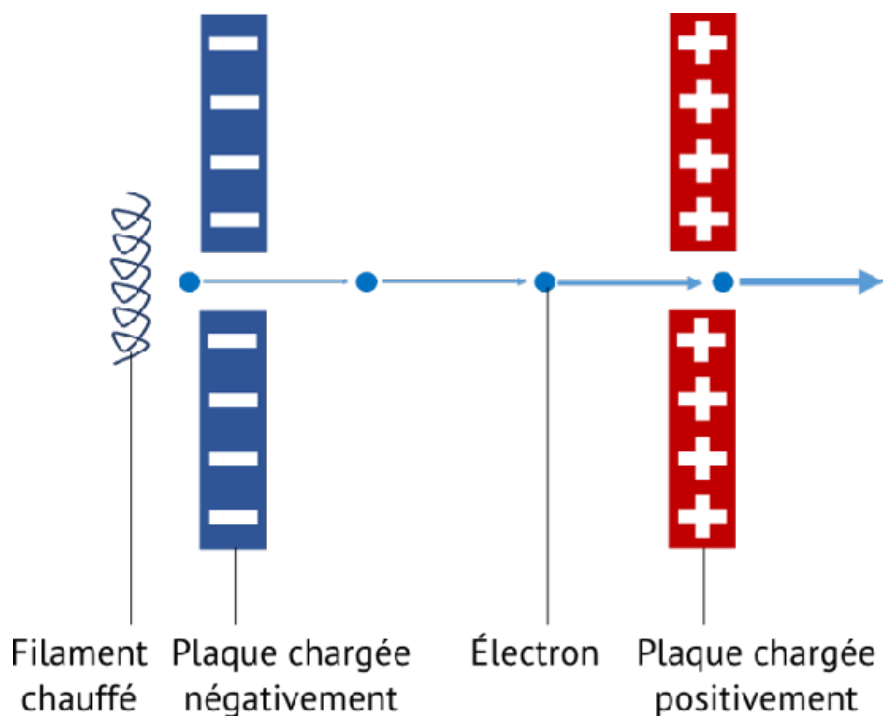


FIG. 5.1: un canon à électrons

À quoi servent les accélérateurs de particules ?

Ce principe d'accélération de particules chargées qui consiste à leur faire traverser des champs électriques est toujours utilisé aujourd'hui : seulement, les dispositifs utilisés sont bien plus grands et utilisent des champs électriques bien plus intenses. Les vitesses atteintes sont ainsi très proches de la vitesse de la lumière.

Lorsqu'une particule accélérée touche une cible, une très grande quantité d'énergie est libérée, et cette énergie se matérialise souvent sous la forme de particules, suivant la relation $E = mc^2$. Si on ne perçoit pas ces transformations à l'œil nu, les détecteurs placés autour

de la zone de collision observent des gerbes de particules particulièrement esthétiques.

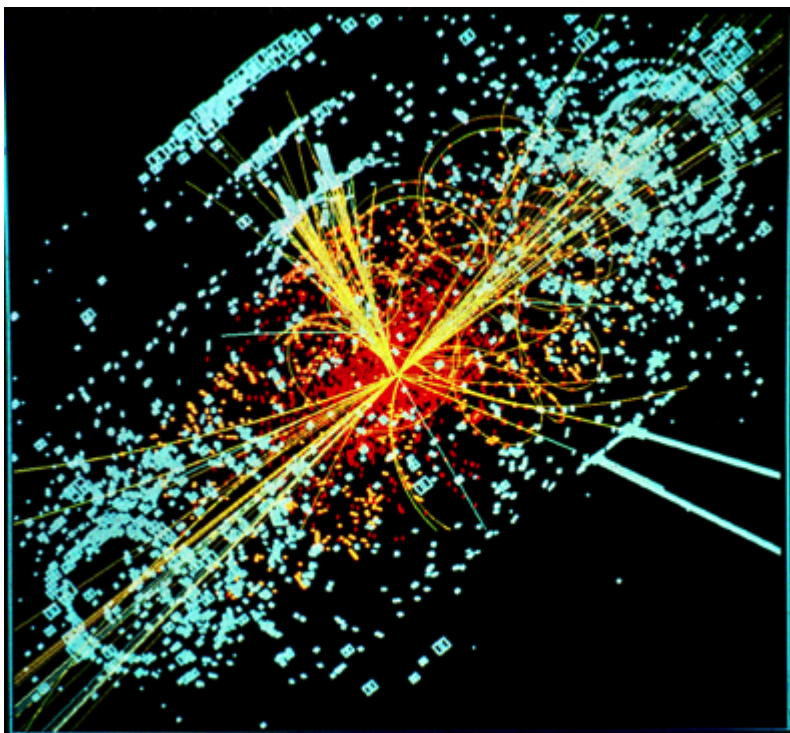


FIG. 5.2: *Simulation d'une collision dans le LHC (CERN)*

De plus, si le choc est assez intense, des particules normalement instables dans la nature peuvent se former, tant qu'il y a assez d'énergie. C'est ainsi que les quarks top et bottom ont vu leur existence expérimentale prouvée, tout comme les bosons W et Z.

Pour découvrir des particules de masses plus élevées, des accélérateurs perfectionnés ont dû être construits, atteignant des vitesses de plus en plus proches de la vitesse de la lumière. De plus, en remplacement du schéma particule accélérée/cibles, les scientifiques ont petit à petit utilisé des accélérateurs qui accéléraient des particules dans deux directions opposées et les font se rencontrer : l'énergie qui résulte de cette collision est bien plus élevée. L'accélérateur de particules le plus perfectionné actuellement est le Large Hadron Collider (LHC), qui chaque seconde peut provoquer la

collision de 1,2 milliards de protons, allant à une vitesse de 0,999999991 c. Chaque collision correspond à une énergie de 14 TeV (soit la masse d'environ 15 000 protons). Grâce à de telles énergies, la théorie de Brout-Englert-Higgs a pu être validée, avec la confirmation de l'existence du boson qui porte le même nom : BEH, ou boson de Higgs.

Le boson de Higgs

Un manque dans le modèle standard

Le modèle standard décrit toutes les particules que nous connaissons, et associées à quelques lois physiques, il nous permet de décrire le comportement de tout ce qu'il y a dans l'univers, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Pour que les lois s'appliquent correctement, il est important de connaître les caractéristiques des particules étudiées. Ainsi, si l'on peut prédire correctement le comportement de particules chargées en électromagnétisme, c'est parce que l'on connaît avec une grande exactitude la valeur de leur charge, caractéristique intrinsèque de chaque particule.

Néanmoins, les lois physiques du modèle standard ne permettaient pas d'obtenir toujours des résultats cohérents lorsque l'on touchait à la masse des particules élémentaires. D'après les lois de la théorie électrofaible, toutes les particules devraient avoir une masse nulle. Il a ainsi fallu rajouter un ingrédient au modèle standard.

Le mécanisme de Higgs

En réalité, la masse d'une particule élémentaire ne provient pas de rien, elle lui est conférée par un champ. Tout comme le champ gravitationnel de la Terre confère aux objets un poids, le champ de Higgs confère aux particules élémentaires une masse. Plus un objet interagit avec le champ gravitationnel de la Terre, plus son poids est important. De même, plus l'interaction de la particule avec le champ de Higgs est grande, plus la masse donnée à la particule est importante.

d'une énergie de liaison qui avec la relation $E = mc^2$ se matérialise sous la forme d'une masse. Ainsi, la plus grande partie de notre masse ne provient pas des particules élémentaires qui nous composent mais de cette énergie de liaison.

La recherche du boson de Higgs

Le mécanisme de Higgs a été prédit en 1964 par de grandes démonstrations théoriques, comment prouver expérimentalement sa validité ? Il paraît difficile de démontrer pourquoi un électron a une masse...

En plus de prédire l'existence d'un champ, Higgs a montré qu'un boson, résidu du champ qui porte aujourd'hui son nom, devait exister. Ce boson de Higgs interagit beaucoup avec le champ qui en est à l'origine : il a une grande masse (environ 125 GeV, soit la masse de 133 protons). Par conséquent, pour le produire, il faut de grands accélérateurs capables d'atteindre des énergies bien supérieures : c'est dans le cadre de cette recherche du boson de Higgs que le LHC est né. Lors de chaque collision de protons, il existe une faible probabilité pour que le boson BEH apparaisse.

Néanmoins, cette particule ne reste pas bien longtemps intacte. Sa durée de vie n'excède pas la dizaine de zeptosecondes (10^{-21} s). Impossible de le détecter directement dans ces conditions ! Ce que l'on observe au LHC, ce sont les produits de la désintégration de ce boson, qui peuvent être de diverses natures.

En analysant les gerbes de particules qui s'échappaient de chaque collision et en isolant celles qui correspondaient aux modes de désintégration du boson de Higgs (particulièrement en deux photons), les scientifiques du LHC parvinrent à réunir assez d'informations pour annoncer au public, en juillet 2012, qu'ils avaient identifié une particule correspondant au boson de Higgs, avec une fiabilité dans leurs données de 99,99997 %.

Le boson BEH est ainsi la dernière particule que nous avons pu rajouter dans la liste des particules connues du modèle standard à l'heure où j'écris ces lignes.

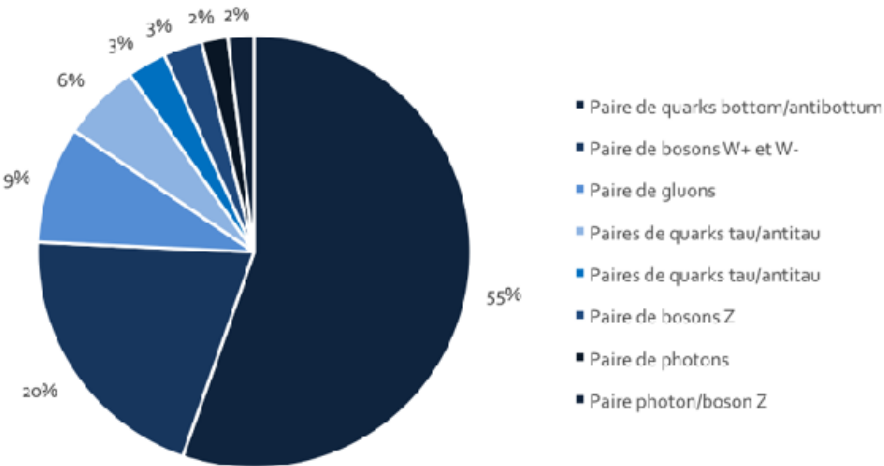


FIG. 5.3: Modes de désintégration du boson de Higgs

« La vérité ne triomphe jamais, ses adversaires s'éteignent juste. »

Max Planck

Ce qu'il faut bien comprendre

- Un accélérateur de particules permet, comme son nom l'indique, d'accélérer des particules pour créer des collisions.
- C'est en créant des collisions que de nouvelles particules peuvent apparaître : ce fut ainsi que l'on démontra l'existence des quarks.
- Lorsqu'une collision a lieu, des particules peuvent apparaître pendant seulement quelques nanosecondes avant de se désintégrer. C'est parfois en étudiant simplement le produit de leur désintégration que les scientifiques découvrent des particules.
- C'est ce qu'il s'est passé avec le Boson de Higgs en 2012 au LHC. Ce boson était la pièce manquante du modèle standard.

Conclusion

Ce LHC qui a tant fait parler de lui est une installation financée principalement par le CERN, et donc par des fonds européens. Indirectement, ce sont tous les contribuables de l'UE et d'autres pays qui auront permis l'édification de cet édifice grandiose de neuf milliards d'euros. Par ce projet, la physique théorique s'est construite une place plus importante au cœur de la société, et ses exploits ont été relayés dans la presse avec insistance : le LHC aura été un investissement réussi. Néanmoins, ceci n'est qu'un exemple de la nouvelle place qu'occupe la physique dans la société moderne. En effet, à l'ère des hautes technologies, la connaissance scientifique est d'une grande valeur et devient indispensable à la compréhension des rouages de ce nouveau monde. Chacun devrait – à notre sens – se doter d'une culture scientifique de base pour échapper aux idées reçues et mieux comprendre les éléments scientifiques omniprésents dans notre environnement.

Nous espérons ainsi que cette introduction vous aura satisfaite, ou du moins qu'elle aura joué son rôle : vous donner une vision claire de ce qu'est la physique quantique. Libre à vous de choisir ce que vous en ferez. Vous pourrez bien sûr continuer à apprendre sur le monde de l'infiniment petit, en particulier sur la mathématisation des phénomènes s'y déroulant. Nous espérons dans ce cas que ce livre fera pour vous un lien entre les concepts de base de la mécanique quantique et ses aspects théoriques.

Vous pourrez également partir à la découverte d'autres aspects de la physique : il serait dommage de ne s'intéresser qu'à sa partie quantique. C'est en recoupant divers aspects des sciences que l'on peut en cerner les contours ; et nous souhaitons qu'avec cet ouvrage votre vision de la physique sera désormais plus nette. Il se peut enfin que vous ne soyez que de passage dans le monde scientifique. Nous vous remercions d'avoir fait ce détour, et espérons qu'il vous aura été

utile.

A tous nous donnerons enfin un avis final : continuez à apprendre, dans tous les domaines. Nous vivons dans un monde où l'apprentissage est de plus en plus aisé, et où les contraintes d'espace et d'argent tendent à diminuer. Il serait dommage de ne pas en profiter !

Vincent Rollet

